



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Análisis comparativo del comportamiento del agua en
un reservorio elevado durante un evento sísmico**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Pierre Oswaldo CHERO MORALES

ASESOR

Douglas Donal SARANGO JULCA

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Chero, P. (2020). *Análisis comparativo del comportamiento del agua en un reservorio elevado durante un evento sísmico*. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Hoja de Metadatos complementarios

Código ORCID del autor	0000-0002-7168-4361
DNI o pasaporte del autor	46400669
Código ORCID del asesor	0000-0001-7963-1507
DNI o pasaporte del asesor	07136313
Grupo de investigación	“—”
Agencia financiadora	Financiamiento propio.
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Lima, Escuela de Ingeniería Mecánica de Fluidos. 12°03'24.4"S 77°05'13.7"W
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 - 2019
Disciplinas OCDE	<p>Ingeniería civil http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01</p> <p>Ingeniería estructural y municipal http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.04</p> <p>Ingeniería del Petróleo, Energía, Combustibles http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03</p>



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE
FLUIDOS**

Siendo las 18:00 horas del martes 11 de noviembre de 2020, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Ing. JOSÉ FELICIANO JUÁREZ (Presidente), Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA (Miembro), Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE (Miembro) y el MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad M1 – Por Sustentación y aprobación de Tesis Profesional, del Bachiller:

PIERRE OSWALDO CHERO MORALES

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como del Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis titulada: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DEL AGUA EN UN RESERVORIO ELEVADO DURANTE UN EVENTO SÍSMICO”.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación el Presidente de Jurado invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

(17)	DIECISIETE
.....
(NÚMERO)	(LETRAS)

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional y su elevación al Consejo Universitario para conferir el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos al Bachiller PIERRE OSWALDO CHERO MORALES.



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

Siendo las 19:00 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 11 de noviembre de 2020

ING. JOSÉ FELICIANO JUÁREZ CÉSPEDES
PRESIDENTE DEL JURADO

ING. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
MIEMBRO DEL JURADO

DR. ARISTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE
MIEMBRO DEL JURADO

MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
ASESOR DE TESIS



UNMSM

Firmado digitalmente por GASTELO
VILLANUEVA Jorge Luis FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 13.11.2020 18:15:33 -05:00

DR. ING. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us02web.zoom.us/j/81172844174?pwd=NIZic3p0K2lyV1BMd1dJZEwwZGJIQT09>

ID de reunión: 811 7284 4174

Código de acceso: 036789

Grabación archivada en el siguiente enlace:

<https://www.facebook.com/FCFUNMSM>



Dedicatoria:

Con sincero cariño un agradecimiento eterno a mis padres, Oswaldo Chero Becerra y Julia Morales Cabrera, que, gracias a sus consejos, apoyo, buen juicio y paciencia, supieron moldear en mí a una persona con valores y actitud positiva para hacerle frente a la vida. Así mismo un agradecimiento a mis 3 hermanos, que trazaron el sendero de la vida por el cual transitar con seguridad y confianza.

También agradecer la atención y consejos de mi asesor de tesis el Ing. MSc Douglas Sarango Julca, que, sin su apoyo, no hubiera sido posible la realización de este trabajo. Una gran persona e investigador, gran ejemplo de maestro y guía.

RESUMEN

La presente Tesis tiene como objetivo hacer una comparación entre los métodos existentes de cálculo para esfuerzos (fuerza cortante, momento, etc.) y oleajes sobre reservorios durante un evento sísmico, en este caso para reservorios elevados tipo fuste. Entre los métodos que vamos a analizar, tenemos: el método de Housner, ACI 360-06 y Navier Stokes, asimismo realizaremos un modelo con la ayuda del software computacional SAP 2000 (structural Analysis Program Computers & Structures Inc.) y evaluaremos los resultados que nos arroja. Veremos una reseña histórica de los eventos sísmicos ocurridos en los últimos años y como estos han afectado estructuralmente a los reservorios, se predimensionará el reservorio y se empezará con el análisis por las tres teorías ya antes mencionadas. Finalmente, se concluirá y recomendará para futuras investigaciones sobre el tema.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to make a comparison between the methods of calculating stress (shear force, moment, etc.) and waves on reservoirs during a seismic event, in this case for high reservoir-type reservoirs. Among the methods that we are going to analyze, we have: the Houssner method, ACI 360-06 and Navier Stokes, we will also make a model with the help of the computer software SAP 2000 (Program of structural Analysis Computers and Structures Inc.) and we will evaluate the results that throws us We will see a historical review of the seismic events that occurred in recent years and how these have been structurally affected to the reservoirs, the reservoir is pre-dimensioned and the analysis of the theories and previous ones is begun. Finally, it will be concluded and recommended for future research on the subject.

INDICE GENERAL

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	14
2.1 OBJETIVOS	14
2.1.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	15
2.3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	15
3 MARCO TEÓRICO	16
3.1 GENERALIDADES	16
3.1.1 DEFINICIÓN	16
3.1.2 USOS E IMPORTANCIA.....	17
3.1.3 TIPOLOGÍA DE TANQUES	18
3.2 ANTECEDENTES	26
3.2.1 INVESTIGACIÓN SOBRE ANÁLISIS DE TANQUES	26
3.2.1 TANQUES DE AGUA EN LIMA	35
3.3 VULNERABILIDAD DE TANQUES ANTE SISMOS.....	40
3.3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	40

3.4 MODELOS DINÁMICOS PARA ANÁLISIS DE TANQUES CON CONTENIDO LÍQUIDO	42
3.4.1 MODELO DE HOUSNER.....	44
3.4.2 MODELO A PARTIR DE ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS O ECUACIONES DE NAVIER-STOKES	60
4. LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	72
4.1 PROYECTO DE APLICACIÓN.....	72
4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	72
4.1.2. PREDIMENSIONAMIENTO	72
4.2. CÁLCULO Y ANÁLISIS DINÁMICO DE PROPUESTAS DEL PROYECTO	73
4.2.1 TANQUE ELEVADO POR EL MÉTODO DE HOUSNER.....	74
4.2.2 TANQUE ELEVADO POR EL MÉTODO DE ECUACIONES DE NAVIER-STOKES..	82
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	86
5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	86
5.2. APOORTE DE LA INVESTIGACIÓN	90
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
6.1 CONCLUSIONES.....	94
6.2 RECOMENDACIONES	94
6.3 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	95
7. BIBLIOGRAFÍA	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1. Terremotos que provocaron fallas en tanques	39
Tabla2. Factores de Zona (Z).....	51
Tabla3. Factor de Suelo (S) y periodo asociado (Tp)	52
Tabla4. Factor de uso de Importancia (I).....	52
Tabla5. Factor de Modificación de Respuesta (Rw).....	53
Tabla6. Cortante y Momento para el tanque elevado modelado con varias masas	82
Tabla7. Frecuencia natural, periodo y pseudo-aceleración asociada para cada modo de vibración para tanque elevado.....	82
Tabla8. Oleaje en metros para los 15 primeros modos de vibración a lo largo del tanque elevado.	83
Tabla9. Comparación de resultados por el Método Housner para tanque elevado.....	86
Tabla10. Comparación de resultados para el modelo mecánico equivalente 1, 2 y 3 masas a partir de las ecuaciones de Navier Stokes para tanque elevado	88
Tabla11. Comparación de respuesta sísmica de Modelos Mecánicos de Housner y a partir de Ecuaciones Navier-Stokes	89
Tabla12. Comparación del Oleaje Máximo determinados por varios métodos.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de almacenamiento de tanques.....	19
Figura 2. Clasificación de tanques y almacenamiento según su uso	19
Figura 3. Material de tanques según su fabricación	20
Figura 4. Tanque rectangular y cilíndrico de cemento y acero respectivamente.....	21
Figura 5. Tanque esférico industrial	21
Figura 6. Tanques cilíndricos verticales y horizontales.....	22
Figura 7. Estructuración de tanques.....	22
Figura 8. Tanques elevados de concreto	23
Figura 9. Tanque cilíndrico superficial de concreto	23
Figura 10. Tanque elevado de edificación sobre columnas	25
Figura 11. Tanque elevado de edificación sobre muros estructurales	25
Figura 12. Modelo de masas concentradas para tanque elevado con aislamiento sísmico	27
Figura 13. Modelo masa resorte para tanques elevados.....	28
Figura 14. Tanque elevado en Av. Primavera – San Borja, de 600 m ³ de volumen aprox.	35
Figura 15. Tanque elevado en Parque de la Cruz - San Borja, de 500 m ³ de volumen aprox.	36
Figura 16. Tanque elevado esférico en Av. Caminos del Inca -San Borja, de 4 m de radio	36
Figura 17. Tanque elevado en Parque Ingenieros -San Borja, de 10 m de radio aprox.....	37
Figura 18. Tanque elevado cónico en Av. Gerardo Unger -Comas, de 600 m ³ de capacidad	37
Figura 19. Tanque apoyado circular en Collique, de 200 m ³ de capacidad de volumen	38

Figura 20. Construcción de reservorio apoyado de 2000 m ³ en Jicamarca, de 20 m de diámetro y 6.40 m de tirante de agua.	39
Figura 21. Tanque vertical en hospital que volcó en el sismo de Northridge 1994.....	41
Figura 22. Modelo Mecánico Equivalente Masa-Resorte de Housner	44
Figura 23. Presiones impulsivas y resultantes	45
Figura 24. Presiones convectivas y resultantes.....	46
Figura 25. Distribución de presiones hidrodinámicas impulsivas y convectivas	46
Figura 26. Modelo masa resorte para tanque rectangular	47
Figura 27. Modelo masa resorte para tanque circular	48
<i>Figura 28. Modelación Masa-Resorte de un tanque elevado</i>	<i>50</i>
Figura 29. Idealización de modelo de 2 masas para un tanque elevado	50
Figura 30. Sistema de coordenadas para la obtención de las ecuaciones de oscilación de la superficie libre del agua en un tanque rectangular.....	62
<i>Figura 31. Sistema de coordenadas para la obtención de las ecuaciones de oscilación de la superficie libre del agua en un tanque circular</i>	<i>65</i>
Figura 32. Esquema del Modelo Mecánico Equivalente	68
<i>Figura 33. Modelación de masa convectiva e impulsiva en SAP2000</i>	<i>71</i>
Figura 34. Propuesta de reservorio de 250 m ³	73
Figura 35. Modelo Masa-Resorte para la propuesta del tanque elevado.	76
Figura 36. Espectro de Pseudo-aceleraciones	77

Figura 37. Fuerza lateral de la presión impulsiva para el tanque elevado	79
<i>Figura 38.</i> Fuerza lateral de la presión convectiva para el tanque elevado.	79
Figura 39. Distribución de presiones impulsivas y convectivas para el tanque elevado.	80
<i>Figura 40.</i> Parámetros del modelo mecánico equivalente para el tanque elevado.	82
Figura 41. Variación del oleaje de 5 primeros modos vibración para tanque circular.....	85
Figura 42. Comparación de la distribución de presiones impulsivas y convectivas para el tanque elevado.	86
Figura 43. Valores de Cortante y Momento con el Método Housner para tanque elevado. ...	87
Figura 44. Valores de Cortante y Momento, modelo mecánico equivalente 1, 2 y 3 masas por las ecuaciones de Navier Stokes.	89
Figura 45. Valores de Cortante y Momento para los Modelos Mecánicos de Housner y a partir de Ecuaciones Navier-Stokes	90
Figura 46. Oleaje Máximo determinados por diversos métodos presentados.....	91

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto busca analizar un tanque elevado y su respuesta estructural para de esta manera ver que tan seguro pueda ser ante solicitaciones de peso propio y carga sísmica, se muestran tanques de industrias y todos los tipos de tanques usados en varias aplicaciones de ingeniería. En la actualidad nos encontramos con un crecimiento de la población anual peruana del 1.1% lo cual ha llevado a la urbanización de nuevos espacios dando lugar a nuevos proyectos de saneamiento. La importancia del estudio surge en que estos sistemas son piezas fundamentales en cuanto al abastecimiento y distribución del fluido en la zona urbana y rural, es por ello que se tiene que realizar un correcto cálculo hidráulico, tanto de manera estática como de manera dinámica.

En nuestro país aún no se ha realizado una investigación exhaustiva y de calidad como para generar algún código de diseño en cuanto a estructuras de concreto o acero, lo que sí tenemos son normas que, ayudadas por códigos extranjeros, podemos de esa manera generar diseños para la construcción de reservorios.

Es un tema bastante amplio y de mucho interés aunque hoy en día la especialización en el tema aún es punto de discusión, como siempre sucede esperamos a que pase primero un desastre para luego de ello realizar modificaciones al diseño presentado, hace falta de simuladores de calidad y calibrados a nuestra región, como teniendo en cuenta el tipo de suelo, condiciones hidrográficas, avenidas, etc. Creo que todo esto mejorará en la medida que haya políticas de estado que promuevan la investigación en este campo. No esperemos a lo que sucede frecuentemente en épocas de verano en la costa, en donde los ríos por las altas lluvias en la sierra llegan con fuerza arrasando con las viviendas aledañas al valle del río, recién ahí se toman medidas de limpieza,

defensas ribereñas, esto no es novedad, los fenómenos naturales suceden todos los años y en épocas específicas, es hora de tomar consciencia, es hora de avanzar realmente.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Análisis, cálculo y diseño de un reservorio tipo Fuste ubicado en el departamento de Lima por la aplicación de fuerzas dinámicas convectivas e impulsivas generadas tras el evento sísmico, para de esta manera evaluar el oleaje ocurrido en el reservorio.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Predimensionamiento del reservorio, cálculo del espesor de la pared del Fuste, de la pared en contacto con el agua, de los anillos así también como el de la cúpula.
- Descripción y comparación de los resultados entre el método de Housner, Navier Stokes y del código ACI (America Concrete Institute), resultados tales como la fuerza cortante, periodo de vibración, fuerzas convectivas e impulsivas y oleaje máximo.
- Cálculo del periodo fundamental de vibración del reservorio según el reglamento nacional de edificaciones (RNE).
- Uso del Modelo matemático ya existente y estudiado, para la confirmación de resultados del reservorio elevado tipo Fuste que se está analizando.

2.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Se hará una investigación en donde veremos el comportamiento de un reservorio elevado en el momento de un sismo, compararemos dos métodos de cálculo. Hallaremos respuestas tanto de fuerzas cortantes, desplazamientos del fluido (oleaje) y momento producido. Para este análisis haremos uso del software de simulación SAP 2000, de las fórmulas matemáticas y de la hoja de cálculo Excel.

2.3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología desarrollada consta en primero usar el método de Housner, Navier Stokes y finalmente el software de simulación estructural SAP 2000. Todos estos métodos o soluciones nos ayudarán a realizar el cálculo de las fuerzas y momentos producidos en un tanque elevado, asimismo el método de Navier Stokes nos ayudará a ver el comportamiento fluido dinámico y el oleaje producido dentro del reservorio. Cabe recalcar que el uso del programa SAP 2000 no es un método de cálculo sino una simplificación del modelo matemático, esto quiere decir que es sólo una herramienta de cálculo o extensión de nuestros conocimientos. Luego compararemos dichos resultados (cortantes, momentos y movimiento fluido-dinámico) mediante los “métodos” utilizados y veremos el porcentaje de diferencia entre cada uno, para así poder hallar conclusiones a la investigación.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 DEFINICIÓN

Un tanque se define como un espacio en donde se puedan almacenar productos de diferente composición tales como agua, gas, granos de maíz, fluidos a presión, oxígeno, corrosivos, etc. Su uso está presente en casi todas las industrias desde la alimenticia hasta la minera, pasando por el uso de la población, en donde se vuelve fundamental. A continuación algunas definiciones, según sus autores:

(Guillén & Rojas, 2017) “Los tanques se definen como depósitos diseñados para almacenar una gran gama de productos ya sea en estado líquido como sólido y forman parte de las diferentes industrias en los procesos como producción, tratamiento, transporte, refinación, distribución y de servicios” (pág. 34).

Martínez y Sánchez citado por Guillén y Rojas (2017) afirman:

“Los tanques son estructuras especialmente construidas con el propósito de almacenar algún material o sustancia, son principalmente utilizados para almacenar agua u otros líquidos, tales como combustibles y químicos. Estas estructuras también pueden almacenar gases y desperdicios tanto sólidos como líquidos como también pueden formar parte de procesos productivos o de manufactura, para almacenamiento de granos, y a veces son utilizados como reactores.” (pág. 34)

Tomando en cuenta todas las definiciones anteriores podemos concluir que los reservorio o tanque es un implemento esencial en nuestra sociedad, su estudio es casi obligatorio para poder analizar su comportamiento y así resolver problemas a futuro que se presenten en cuanto a su

diseño.

3.1.2 USOS E IMPORTANCIA

Para esto citaremos definiciones en cuanto a su importancia, según unos autores.

Molina 2013 citado por (Guillén & Rojas, 2017), menciona que “Los tanques tienen una función estratégica ya que son de vital importancia en los sistemas de distribución de agua y en el caso de almacenar sustancias peligrosas corrosivas y/o explosivas tal cual es la industria petroquímica y centrales nucleares” (pág. 34).

“Para ello, es necesario diseñar esta estructura de manera que cumpla un desempeño óptimo, la cual incluya aspectos generales y términos que incorporen los comportamientos críticos que sean originadas por una eventualidad sísmica, teniendo como principal factor que el funcionamiento hidráulico del sistema y que la funcionalidad de esta no se vea afectada estructuralmente después del sismo, dado que al ser una estructura importante, es fundamental que esta se afecte de tal manera que la gestión de este recurso no sea un problema más cuando suceda una eventualidad sísmica” (Coral, Fernández, & Shelly, 2018, pág. 20).

“Asimismo, la paralización de sus funciones por los perjuicios del sismo puede ser tanto a nivel económica como humanos. Desde el punto de vista económico referido a la misma estructura damnificada y el valor económico del líquido derramado; mientras que, a nivel de daños humanos, se refiere a las vidas que corren peligro con el derrame, eventualmente pueden dejar un ambiente tóxico y el corte de agua potable” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 35).

Debido a esto, es que resaltaremos la importancia del análisis sísmico de tanques:

Compagnoni, Curadelli y Martinez (2012) mencionan que:

“El interés por un comportamiento seguro bajo cargas sísmicas, radica no solo en el costo de reposición en caso de falla, sino también en los desastres ambientales que un accidente puede provocar. Por tanto, dada la necesidad de que continúen operando después de un evento sísmico, hace que sea extremadamente importante el estudio de su comportamiento” (pág. 2)

Viendo todas las definiciones anteriores, está bastante claro lo importante que es un reservorio apoyado o elevado, está de por medio el costo de vida humana, el costo monetario de la obra en cuanto a catástrofes naturales o accidentes se refiera. El diseño y construcción adecuado tienen que ser realizados por personas responsables y expertos en el tema, no se puede tomar a la ligera dicha misión.

3.1.3 TIPOLOGÍA DE TANQUES

Clasificación de tanques según forma, función, material, uso que se le va a dar, altura, etc. Puede haber más tipos de clasificación que no se mencionan en la presente tesis. A continuación, se mostrará algunos tipos de clasificación más usados.

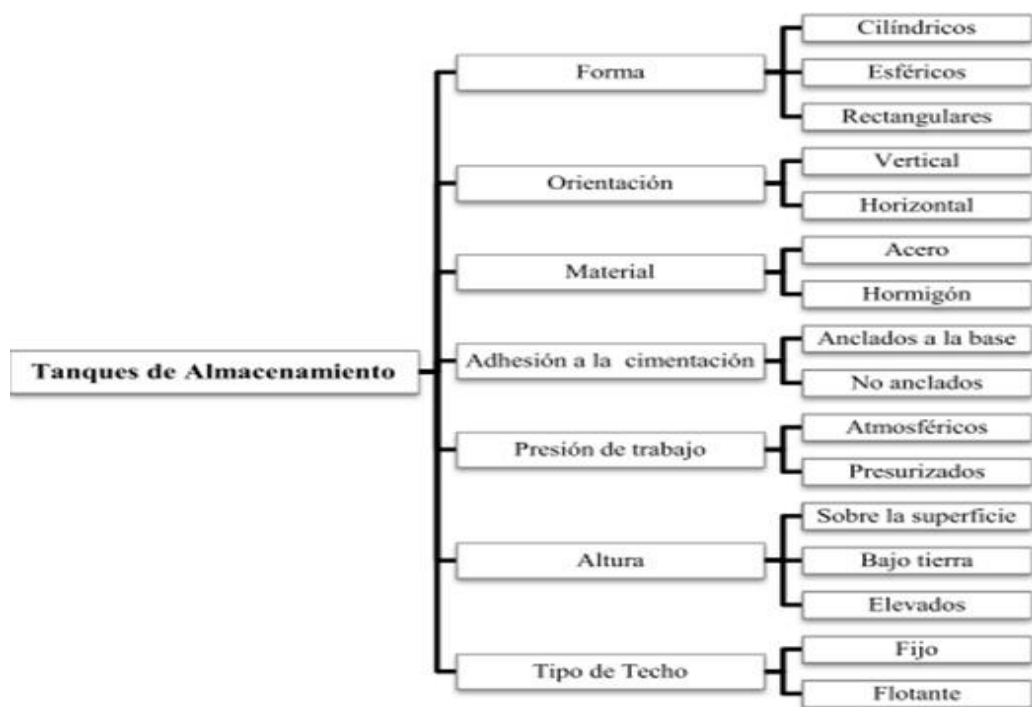


Figura 1. “Clasificación de almacenamiento de tanques”

Fuente: (Pupiales & Yépez, 2013, pág. 27)

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los tanques almacenan sustancias líquidas, sólidas y gaseosas. A continuación, se muestra una alternativa según su uso.

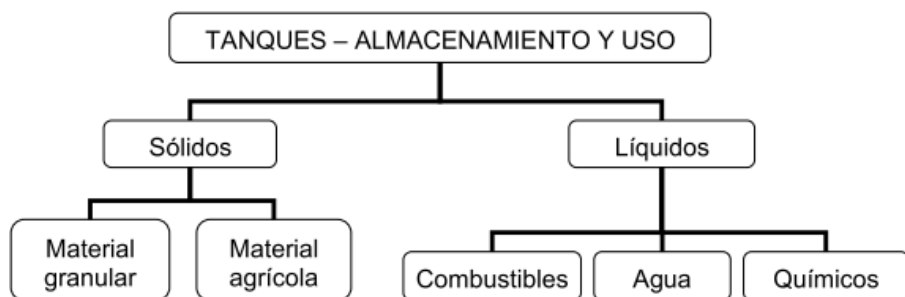


Figura 2. “Clasificación de tanques y almacenamiento según su uso”

Fuente: Arzola 2009 citado en (Guillén & Rojas, 2017, pág. 36)

Los tanques mayormente conocidos son de concreto, aunque también hay construidos de acero. Para el uso residencial y rural es común encontrar tanques hechos por ladrillos o mampostería, para capacidades más pequeñas de almacenamiento.

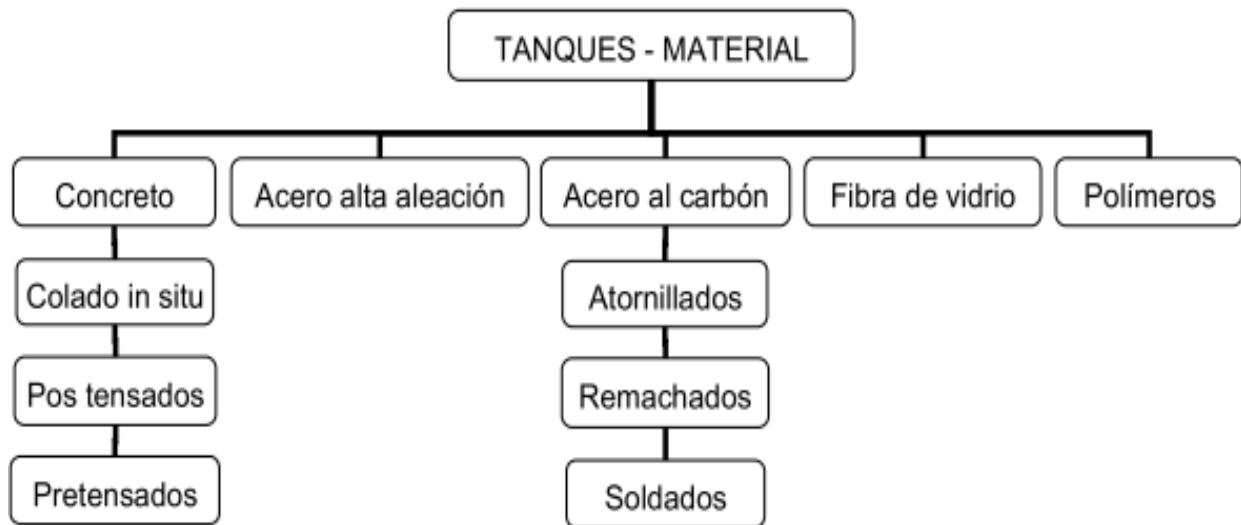


Figura 3. “Material de tanques según su fabricación”

Fuente: (Arzola, 2009) citado en (Guillén & Rojas, 2017, pág. 37)

Generalmente en la industria química, puede ser minera o de petróleo es común ver tanques de acero, resulta ser que el acero es un material sencillo de trabajar, la soldadura ayuda a acelerar dicho proceso sin necesidad del uso de un encofrado. Por el contrario, los tanques de concreto son usados por su alta capacidad a carga, pero con un costo y tiempo mayor que el de acero.

Cada uno de los materiales utilizados tienen sus ventajas y desventajas.

Ejemplos de tanques según su forma.



Figura 4. "Tanque rectangular y cilíndrico de cemento y acero respectivamente"

Fuente: (Hernández H, 2006)



Figura 5. "Tanque esférico industrial"

Fuente: (Hernández H, 2006, pág. 1)

Según (Portillo, 2009) los tanques esféricos, "Tienen la ventaja estructural que las paredes están sometidas a esfuerzos de tensión simple, por lo cual requieren menores espesores, pero tienen la desventaja de costos elevados de encofrado" (p. 53)

También se los puede clasificar según su inclinación: horizontal y vertical.

“Los tanques cilíndricos verticales son para pequeños volúmenes mientras que los tanques cilíndricos horizontales se recomiendan para almacenar grandes volúmenes” (Molina J, 2013, pág. 20).



Figura 6. “Tanques cilíndricos verticales y horizontales”

Fuente: (Pupiales & Yépez, 2013, pág. 28)

(Hernández H, 2006) citado por (Guillén & Rojas, 2017) menciona que: “Normalmente los tanques cilíndricos horizontales presentan fallas por corte y flexión y es recomendable que los tanques cilíndricos verticales se usen a presiones bajas o a presión atmosférica” (pág. 40).

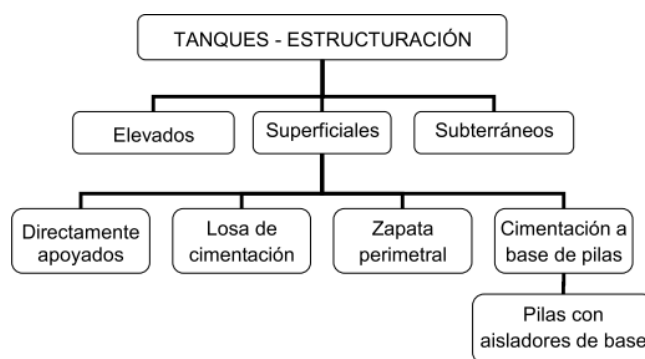


Figura 7. “Estructuración de tanques”

Fuente: (Arzola, 2009)



Figura 8. “Modelos de tanques a altura”

Fuente: (Hernández, 2010)



Figura 9. “Tanque cilíndrico superficial de concreto”

Fuente: (Martínez & Sánchez, 2004, pág. 31)

“Los tanques elevados, que generalmente tienen forma esférica, cilíndrica y de paralelepípedo, son construidos sobre el nivel del suelo en torres, columnas, pilotes, etc.” (Portillo, 2009, pág. 54).

“Para capacidades medianas y pequeñas, como es el caso de los proyectos de abastecimiento de agua potable en poblaciones rurales, resulta tradicional y económica la construcción de un tanque apoyado de forma cuadrada” (Portillo, 2009, pág. 54).

“Los enterrados y apoyados pueden llegar a tener una capacidad de varios miles de metros cúbicos; mientras que los elevados corresponden a diseños donde exista la necesidad de elevar el nivel del agua para una adecuada presión de ésta” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 41).

También tenemos los tanques presurizados, esto para que puedan contener el líquido que necesita esas condiciones especiales para su almacenaje, estos líquidos pueden ser inflamable por eso es necesario tener bastante cuidado con su maniobra y reserva.

“Así mismo es importante mencionar que Los tanques elevados en edificios, se utilizan para solucionar tanto problemas de almacenamiento como también problemas de presión, debido a que las empresas municipales de acueducto garantizan una presión que para edificios de más de dos pisos no es suficiente para poder elevar el agua a pisos superiores, esta es la solución más corriente, aunque existen otros sistemas que no son del interés de esta investigación. Existen diferentes formas de apoyar los tanques, es por eso que se observan tanques sobre muros estructurales, tanques sobre cuatro o dos columnas o tanques apoyados sobre sistemas combinados de muros y columnas.” (Martínez & Sánchez, 2004, pág. 37)



Figura 10. “Tanque sobre cuatro columnas”

Fuente: Martínez y Sánchez (2004)



Figura 11. “Tanque sobre muros de concreto”

Fuente: Martínez y Sánchez (2004)

3.2 ANTECEDENTES

3.2.1 INVESTIGACIÓN SOBRE ANÁLISIS DE TANQUES

Recopilamos información en cuanto a la investigación hecha por organismos o autores nacionales e internacionales en cuanto al estudio dinámico de tanques, esto para los últimos 10 años. De esta manera se conocerá en qué estado o nivel se encuentra el análisis de regiones coterráneas a nuestro país.

Nacional

(Quezada W & Salinas A, 2014) desarrollan una investigación la cual tuvo como principal objetivo “Proponer los parámetros y criterios para el Diseño y Análisis de un Reservorio Tipo Fuste de 300m³”; Este análisis fue realizado con el SAP2000, trabajando con la filosofía del análisis de fuerzas equivalentes o estático y así como el dinámico, con la metodología de Housner cuyo punto se centra en las masas convectivas e inyectivas. Tomaron en cuenta las especificaciones de la norma internacional “SEISMIC DESIGN OF LIQUIDCONTAINING CONCRETE STRUCTURES” (ACI 350.3-01) and Commentary (350.3R-01). Resultado; El valor de la cortante basal dinámica fue de 315.25 Ton. y el cortante basal estático basal fue de 352.43 Ton. obteniendo una relación del $V_{din} = 90\% < V_{est}$, cumpliendo con el parámetro de 90% que exige la norma para estructuras.

Internacional

(Huisa J, 2017), desarrolla una investigación la cual tuvo como objetivo “Formular una guía de diseño que contribuya a mejorar la respuesta sísmica en reservorios de concreto armado para almacenamiento de agua” La investigación, por su naturaleza, fue de carácter teórico explicativa y como técnica utilizó la observación de textos bibliográficos, esta tuvo como resultado de acuerdo a los cálculos realizados para reservorios con base fija y aislada, el autor concluye que los reservorios aislados tienen un mejor comportamiento sísmico, estas redujeron la cortante basal y los momentos volcantes en un ratio de 45%.

3.2.1 TANQUES DE AGUA EN LIMA

Se presentarán a continuación tanques en la ciudad de lima, ubicación y capacidades en m3, según fuentes de google maps.



Figura 12. “Tanque elevado en San Borja – Lima, capacidad instalada de 600 m3 aprox.”

Fuente: Street View 2015



Figura 13. “Tanque elevado en San Borja – Lima, capacidad instalada de 500 m³ aprox.”

Fuente: Street View 2015



Figura 14. “Tanque elevado esférico en San Borja – Lima, radio de 4 m. aprox.”

Fuente: Street View 2015



Figura 15. “Tanque elevado plano en San Borja – Lima, radio de 10 m. aprox.”

Fuente: Street View 2015



Figura 16. “Tanque elevado en Comas – Lima, capacidad instalada de 600 m³ aprox.”

Fuente: SEDAPAL 2014



Figura 17. “Tanque apoyado en Comas – Lima, capacidad instalada de 200 m³ aprox.”

Fuente: SEDAPAL 2014



Figura 18. “Tanque de capacidad 2000 m³ en San Juan de Lurigancho”

Fuente: SEDAPAL 2014

Como se observa en la ciudad de Lima existen diferentes tipos de tanques en diferente escala los cuales están destinados para abastecer a toda la población. Es necesario hacer hincapié en la importancia de que puedan seguir abasteciendo de agua potable a toda la población después de un sismo o que estas construcciones no sufran un colapso causando así más daño a la población maximizando así la magnitud de la emergencia.

Por otro lado, actualmente, en el sector norte de Lima (Los Olivos, San Martín de Porres, Independencia y Comas) el sistema de abastecimiento de agua de agua potable incluye 25 reservorios: 2 semienterrados, 6 elevados y 17 apoyados los cuales tienen una capacidad que van desde los 50 a 3000 m³. Existen reservorios denominados primarios que son en su totalidad tanques apoyados, en su mayoría de concreto y circulares. En la Figura 3.22, se muestra la ubicación y capacidad de volumen de algunos de reservorios primarios operativos de la red de agua potable de Lima gestionada por SEDAPAL. (Guillén & Rojas, 2017, pág. 32)

3.3 VULNERABILIDAD DE TANQUES ANTE SISMOS

“La vulnerabilidad estructural comúnmente se refiere a la variación de índice de daño o la probabilidad de alcanzar el estado límite. Esta vulnerabilidad depende del diseño de las estructuras e independiente a la amenaza sísmica, ya que el comportamiento de cada elemento en riesgo es distinto” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 42).

3.3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

“En la literatura se puede encontrar diversos eventos sísmicos que han producido daños severos en tanques con contenido líquido, a continuación, en la Tabla 3.2, se muestra una lista de los más resaltantes en los últimos 50 años” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 43):

Tabla1.
Terremotos que provocaron fallas en tanques

Lugar	Año
Chile	1960
Anchorague, Alaska	1964
San Fernando, California	1971
San Juan, Argentina	1977
Miyagi - Oki, Japón	1978
Valle Imperial, California	1979
Coalinga, California	1983
Valparaiso, Chile	1985
Saguenay, Canadá	1988
Loma Prieta, California	1989
Fredericton, Canada	1990
Northridge, California	1994
Kobe, Japón	1995
Chi-Chi, Taiwán	1999
Izmit, Turquía	1999
Kocaeli, Turquía	1999
Región de Maule, Chile	2010

Fuente: (Guillén & Rojas, 2017, pág. 43)

“El sismo de Alaska en 1964 fue de una magnitud de 8.4 y causó daños en tanques con contenido líquido localizados en un radio de 160 km del epicentro. En la comunidad de Véz de este estado, se produjo un incendio de varios días debió al colapso de un taque de combustible y sólo en la ciudad de Anchorage, 21 tanques registraron daños, de los cuales 7 almacenaban combustible que al colapsar derramaron cerca de 3 millones de litros de crudo para avión.” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 43)

“El sismo de San Juan, Argentina en 1977 fue de una magnitud de 7.4 ocasionó daños en tanques de aceite y vino, produciendo una pérdida de 10 y 20 millones de litros de este último. En el sismo de Northridge en 1994, cerca de 4 decenas de tanques resultaron inutilizados debido al pandeo de paredes llevándolos al colapso.” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 43)



Figura 19. Tanque vertical que volcó en el sismo de Northridge 1994

Fuente: (Guillén & Rojas, 2017, pág. 44)

3.4 MODELOS DINÁMICOS PARA ANÁLISIS DE TANQUES CON CONTENIDO LÍQUIDO

“Antes de desarrollar los modelos dinámicos, es necesario comprender el fenómeno de como el líquido contenido en un tanque interacciona con las paredes de este en un movimiento sísmico” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 52).

“Cuando hay un sismo el movimiento vibratorio provoca el oleaje o chapoteo del líquido que se encuentra contenido dentro del tanque, cuando esto sucede el líquido disipa una cantidad de energía muy pequeña lo cual quiere decir que el grado de amortiguamiento es muy pequeño. Las presiones del líquido sobre las paredes por los efectos dinámicos contienen una componente por compresibilidad del líquido y otra por el oleaje o Sloshing generado por el movimiento” (Martínez & Sánchez, 2004, pág. 50).

“Desde esa perspectiva, se podría afirmar que las presiones hidrodinámicas rigen la respuesta sísmica de un tanque de con contenido líquido, debido a que este fluido ejercerá presiones dinámicas en la paredes y fondo del tanque durante un evento sísmico. Asimismo, cuando un tanque con contenido líquido está sujeto a un movimiento sísmico, se puede entender de la siguiente forma” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 52):

“La pared del depósito y el líquido sufren una aceleración horizontal. El líquido de la región inferior del tanque se comporta como una masa rígidamente conectada a la pared del depósito (...) se denomina masa impulsiva y acelera con la pared induciendo a presiones hidrodinámicas sobre la pared y también sobre su base o fondo (...). La masa de la región superior es la que sufre el oleaje de la superficie libre, denominándose masa convectiva, pues ejerce presiones

hidrodinámicas convectivas en las paredes y fondo” (Díaz del Valle, 2013, pág. 4).

Dado este contexto según (Martínez & Sánchez, 2004), “Se puede dividir la presión hidroneumática en dos: La presión impulsiva es causada por el líquido que se mueve junto al tanque; mientras que la presión convectiva es causada por el movimiento de oscilación libre de la superficie del líquido (sloshing)” (pág. 45).

En tal sentido según (Pupiales & Yépez, 2013) “La respuesta sísmica en tanques es un fenómeno complejo que incluye la interacción pared-líquido y fuerzas inerciales del fluido, pero que pueden ser simplificadas en sistemas de un grado de libertad representando sus modos de vibración principales” (pág. 36).

“A continuación, el modelo mecánico simplificado masa-resorte propuesto por G.W. Housner” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 53).

3.4.1 MODELO DE HOUSNER

Housner hizo un análisis exhaustivo considerando solo los efectos de una componente horizontal del movimiento del suelo, basado en la ecuación de Laplace por series infinitas, definiendo un modelo simplificado considerando que una parte del líquido contenido del tanque se movía rígidamente con éste y que la otra parte actuaba como una masa sujeta a las paredes por medio de resorte para así lograr representar el chapoteo del líquido. (Guillén & Rojas, 2017, pág. 53)

Como ya se había mencionado anteriormente los efectos dinámicos de la porción del líquido adherido en forma líquida a la pared del tanque se denominan como presiones impulsivas, mientras que los efectos del movimiento oscilatorio del fluido se conocen como presiones convectivas. (Guillén & Rojas, 2017, pág. 53)

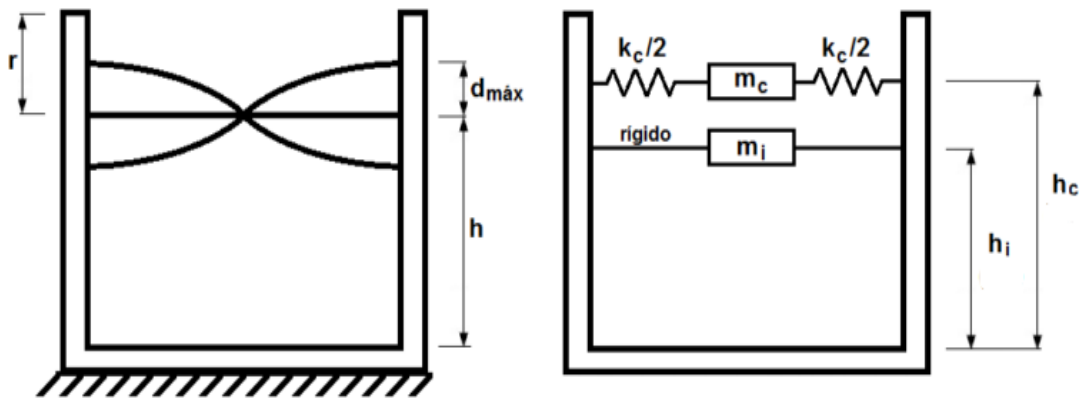


Figura 20. “Modelo Mecánico Equivalente de Housner, Masa-Resorte.”

Fuente: (Díaz del Valle, 2013)

Dónde:

“ h : Altura de la superficie del líquido en estado de reposo

$d_{\text{máx}}$: Altura de oscilación máxima de la superficie del líquido con respecto del estado en reposo

r : Altura del tanque con respecto a la superficie del líquido en reposo

m_i : Masa impulsiva conectada rígidamente a las paredes del tanque a una altura h_i

m_c : Masa convectiva conectada a la pared del tanque a una altura h_c mediante un resorte de rigidez k_c

h_i : Altura de la resultante de las presiones dinámicas impulsivas

h_c : Altura de la resultante de las presiones dinámicas convectiva k_c : Rigidez del resorte que conecta la masa impulsiva a la pared” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 54)

En las siguientes figuras (23 y 24) se observa la distribución de las presiones impulsivas y convectivas.

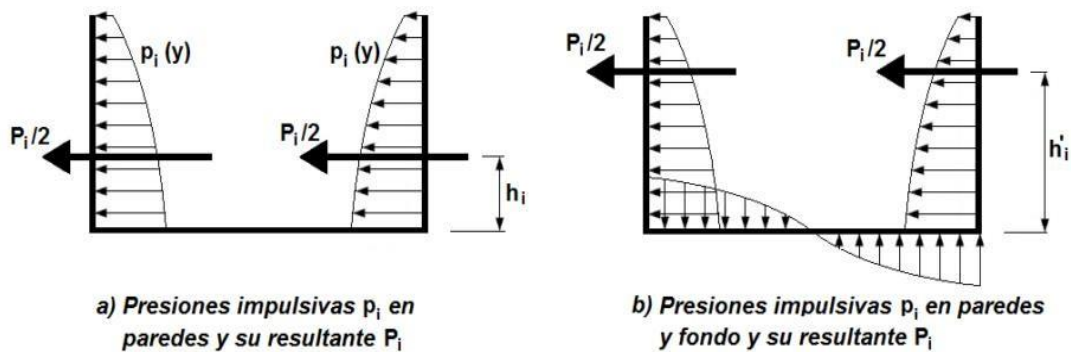


Figura 21. “Presiones impulsivas y resultantes”

Fuente: (Díaz del Valle, 2013)

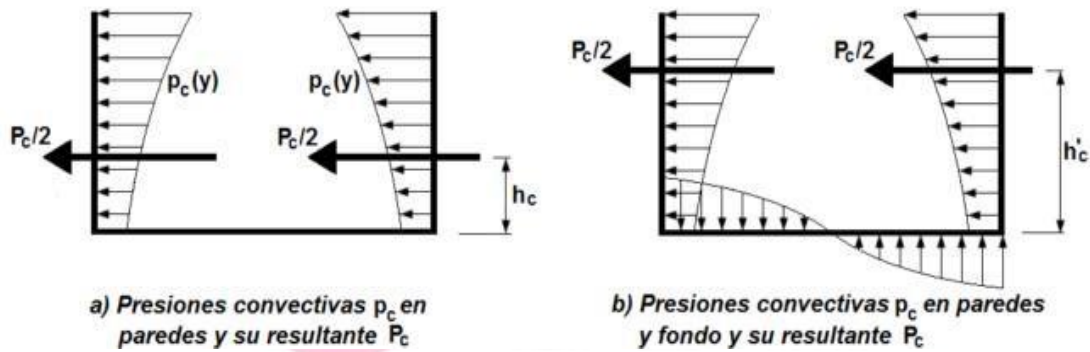


Figura 22. “Presiones convectivas y resultantes”

Fuente: (Díaz del Valle, 2013)

“Como se puede observar h_i es la altura de la resultante de las presiones impulsivas cuando no se considera la presión sobre el fondo, mientras que cuando si se considera la presión la resultante actuará a la altura h'_i . De la misma manera, h_c es la altura de la resultante de las presiones convectivas cuando no se considera la presión sobre el fondo, mientras que cuando si se considera la presión sobre la pared y el fondo la resultante actuará a la altura h'_c . Las alturas h_i y h_c se usan para calcular el momento en la parte inferior de la pared debido a las presiones hidrodinámicas sobre la pared; mientras que h'_i y h'_c se usan para calcular el sobre momento en la base del tanque” (Díaz del Valle, 2013).

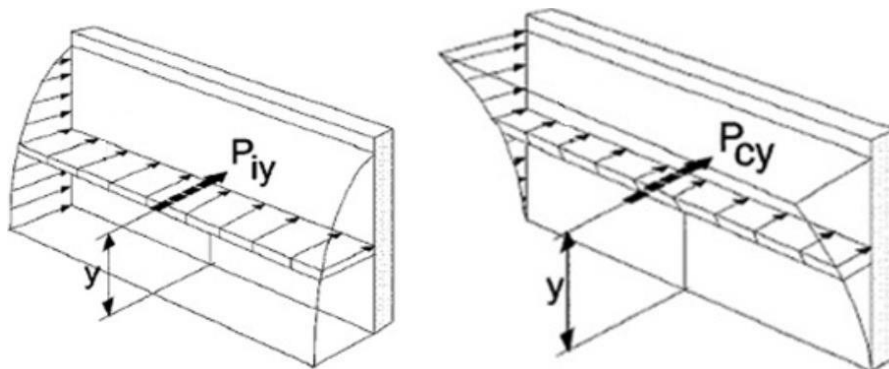


Figura 23. “Distribución de presiones fluido dinámicas tanto impulsivas como convectivas.”

Fuente: (Guillén & Rojas, 2017)

“Los parámetros anteriormente tratados están en función de la geometría del tanque y también dependen de su flexibilidad. Es decir, la forma de calcular los parámetros mediante la propuesta varía según la forma del tanque” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 57).

“Housner (1963), determina dichos parámetros de la siguiente manera (Figura 26) para tanques rectangulares de longitud $2L$ y altura de agua h ”:

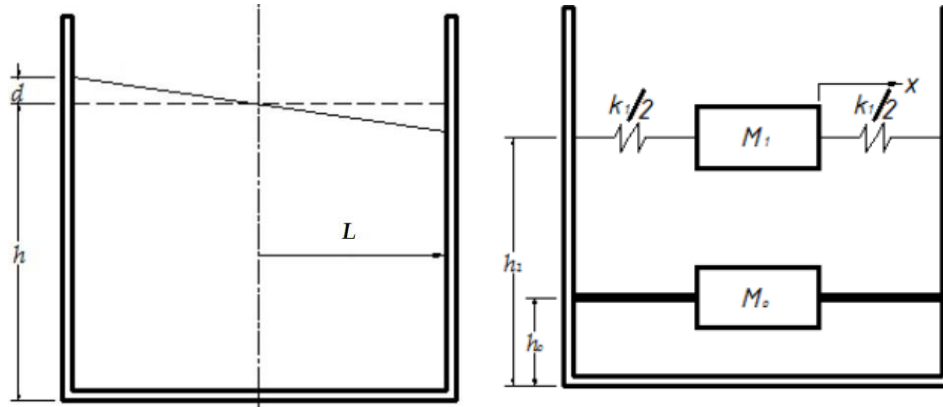


Figura 24. “Modelo masa y resorte para tanque rectangular.”

Fuente: (Guillén & Rojas, 2017, pág. 57)

$$M_o = M \frac{\tanh 1.7L/h}{1.7L/h}$$

$$M_1 = 0.83M \frac{\tanh 1.6h/L}{1.6h/L}$$

$$K_1 = 3 \frac{M_1^2 gh}{M L^2}$$

$$h_o = \frac{3}{8}h \left\{ 1 + \alpha \left[\frac{M}{M_1} \left(\frac{L}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\}$$

$$\alpha = 1.33$$

$$h_1 = h \left[1 - \frac{1}{3} \frac{M}{M_1} \left(\frac{L}{h} \right)^2 - 0.63\beta \frac{L}{h} \sqrt{\left(\frac{ML}{3M_1h} \right)^2 - 1} \right]$$

$$\beta = 2.0$$

“Dónde:

M : Masa del líquido del tanque,

M_0 : Masa Impulsiva,

M_1 : Masa convectiva,

K_1 : Rigidez del resorte conectado a la M_1 ,

h : Altura del agua en reposo,

h_0 : Altura a la que está conectada M_0 ,

h_1 : Altura a la que está conectada M_1 2,

L : Longitud del tanque,

g : Aceleración de la gravedad”. (Guillén & Rojas, 2017)

“Asimismo, los parámetros para tanques circulares de radio R y altura de agua h , quedan definido de la siguiente forma (Figura 27)” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 58):

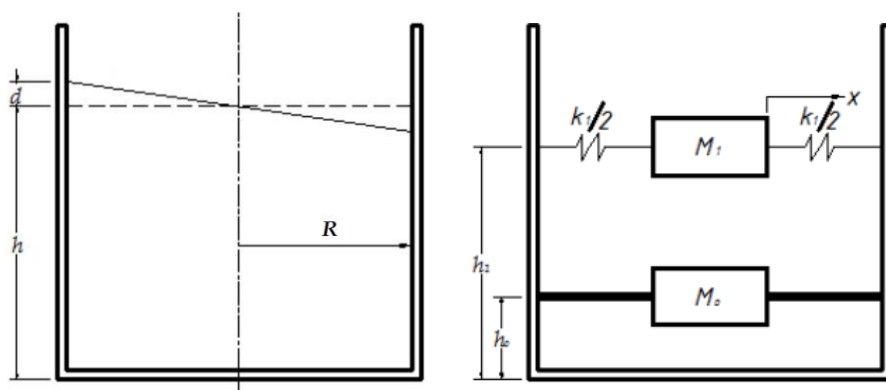


Figura 25. “Modelo masa y resorte para tanque circular.”

Fuente: Adaptado de Housner (1963)

$$M_0 = M \frac{\tanh 1.7R/h}{1.7R/h}$$

$$M_1 = 0.6M \frac{\tanh 1.8h/R}{1.8h/R}$$

$$K_1 = 5.4 \frac{M_1^2 gh}{M R^2}$$

$$h_o = \frac{3}{8} h \left\{ 1 + \alpha \left[\frac{M}{M_1} \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\}$$

$$\alpha = 1.33$$

$$h_1 = h \left[1 - 0.185 \left(\frac{M}{M_1} \right) \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 0.56\beta \frac{R}{h} \sqrt{\left(\frac{MR}{3M_1h} \right)^2 - 1} \right]$$

$$\beta = 2.0$$

“Dónde:

M_0 : Masa del líquido del tanque M_0 : Masa impulsiva,

M_1 : Masa convectiva,

K_1 : Rigidez del resorte conectado a la M_1 ,

h : Altura del agua en reposo,

h_0 : Altura a la que está conectada M_0 ,

h_1 : Altura a la que está conectada M_1 R : Radio del tanque,

g : aceleración de la gravedad” (Guillén & Rojas, 2017, págs. 59-60).

“De la misma manera, se resalta que los coeficientes $\alpha = 0$ y $\beta = 1$ se deberán utilizar cuando se quiere hallar las fuerzas cuando actúan sólo sobre los muros tanque y no sobre la base” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 60).

Para tanques elevados, la modelación varía y se utiliza un modelo de 2 masas; sin embargo, los parámetros se obtienen de igual manera que los casos anteriores. Se añade al modelo una masa “ m_s ”, correspondiente a la masa estructural igual a la tercera parte de la masa de la estructura de soporte y masa del contenedor del soporte. Esta última debe incluir la masa de la cubierta, paredes y losa del fondo. (Guillén & Rojas, 2017, pág. 61)

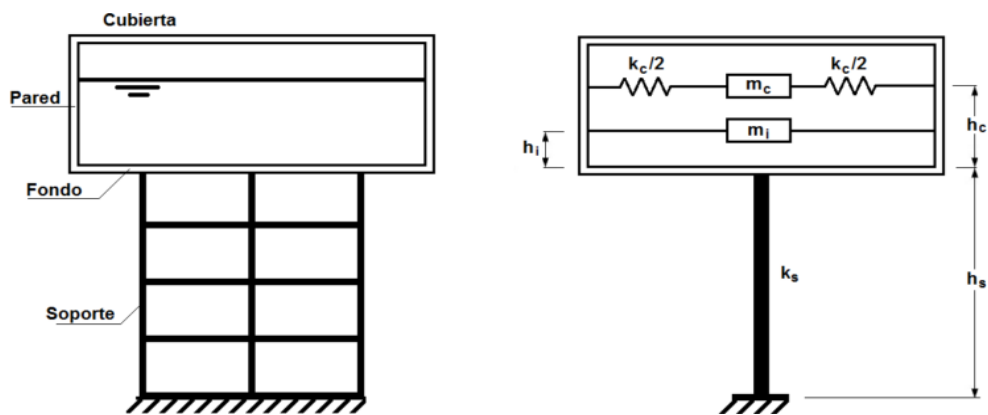


Figura 26. “Modelación Masa-Resorte de un tanque elevado”

Fuente: Díaz del Valle 2013



Figura 27. “Idealización de modelo de 2 masas para un tanque elevado”

Fuente: (Díaz del Valle, 2013)

“Dónde:

- m_i : Masa impulsiva conectada rígidamente a las paredes del tanque,
- m_c : Masa convectiva conectada a la pared del tanque,
- m_s : Masa de la estructura de soporte,
- h_i : Altura de la resultante de las presiones dinámicas impulsivas,
- h_c : Altura de la resultante de las presiones dinámicas convectiva,
- h_s : Altura de la estructura de soporte,
- k_c : Rigidez del resorte que conecta la masa impulsiva a la pared tanque
- k_s : Rigidez de la estructura de soporte” (Guillén & Rojas, 2017, págs. 62-63).

“Con el fin de obtener las fuerzas sísmicas, que es nuestro objetivo, un paso necesario será determinar la pseudo-aceleración. Para esto Llasa (2012), propone generar el espectro de pseudo-aceleraciones a partir de las recomendaciones del código ACI 360.3- 01, en compatibilización con el reglamento peruano E-0.30. De esta manera, los parámetros de Zona (Z), Suelo (S) y periodo asociado al terreno (T_p), el coeficiente de amplificación sísmica (C) los obtenemos de la norma peruana. Incluso el factor de Uso o de Importancia (I) puede ser obtenido de la misma forma; sin embargo, el coeficiente de reducción (R), se compatibiliza los establecidos en el código ACI 350.3-01, donde se denomina factor de modificación de la respuesta. En este sentido el espectro de pseudo-aceleraciones se puede calcular como” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 63):

“Pseudo aceleración (aceleración espectral) para periodo impulsivo” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 63):

$$Sa = \frac{Z.I.S.C_{(ti)}}{R_{wi}} g$$

“Pseudo aceleración (aceleración espectral) para periodo convectivo” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 63):

$$Sa = \frac{Z.I.S.C_{(tc)}}{R_{wc}} g$$

Dónde:

$C_{(ti)}$: coeficiente de amplificación sísmica para periodo impulsivo

$C_{(tc)}$: coeficiente de amplificación sísmica para periodo convectivo

R_{wi} : Factor de modificación de respuesta para periodo impulsivo

R_{wc} : Factor de modificación de respuesta para periodo convectivo” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 63).

“Cabe recordar que según el ACI-350.3-01, los periodos asociados a la masa impulsiva son los periodos cortos menores a 2.40 s; y los asociados a la masa convectiva son los periodos largos mayores a 2.40 s” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 64).

“En este sentido, los parámetros de Zona (Z), Suelo (S) y periodo asociado al terreno (Tp), el coeficiente de amplificación sísmica (C) serán obtenidos de la norma peruana de diseño sismo resistente E030-2006. Mientras que los factores de importancia (I) y factor de modificación de la respuesta (R) serán obtenidas de las recomendaciones del ACI 350.3-01. Y son presentados en las siguientes tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 64).

Tabla1.

Factores de Zona (Z)

FACTORES DE ZONA	
ZONA	Z
3	0,4
2	0,3
1	0,15

Fuente: “Normas E.030 -2006” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 64).

Tabla2.

Factor de Suelo (S) y periodo asociado (Tp)

Tipo	Descripción	T _p (s)	S
S ₁	Roca o suelos muy rígidos	0,4	1,0
S ₂	Suelos intermedios	0,6	1,2
S ₃	Suelos flexibles o con estrados de gran espesor	0,9	1,4
S ₄	Condiciones excepcionales	-	-

Fuente: “Normas E.030 -2006” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 64).

Tabla3.

Factor de uso de Importancia (I)

USO	I
Tanques que contienen materiales peligrosos	1.50
Tanques que son proyectados para seguir funcionando después de un sismo	1.25
Tanques que son parte de un sistema de abastecimiento importante	1.25
Todos los otros tanques	1

Fuente: “ACI 350.3-01” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 64).

Tabla4.
Factor de Modificación de Respuesta (R_w)

Tipo de tanque	R_{wi} (Superficial)	R_{wi} (Enterrado)	R_{wc}
Tanques anclados o base flexible	4.50	4.25	1
Tanques de base fija o articulada	2.75	4	1
Tanques sin anclar, encerrados o abiertos	2	2.75	1
Tanques elevados	3	0	1

Fuente: “ACI 350.3-01” (Guillén & Rojas, 2017).

“Asimismo, para el cálculo de las fuerzas dinámicas laterales, según el código ACI-350- 01, puede ser determinado” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 65):

“Fuerza inercial lateral del muro del tanque: $P_w = ZSIC_i \times \frac{\varepsilon W_w}{R_{wi}}$

Fuerza inercial lateral de la losa del techo: $P_c = ZSIC_c \times \frac{W_c}{R_{wc}}$

Fuerza inercial lateral impulsiva: $P_r = ZSIC_i \times \frac{W_r}{R_{wi}}$

Fuerza inercial lateral convectiva” $P_i = ZSIC_i \times \frac{W_i}{R_{wi}}$

(Guillén & Rojas, 2017, pág. 65).

“Dónde:

Z: Factor de zona S: Factor de Suelo

I: Factor de Uso o Importancia

W_i : Peso del elemento i en mención

C_i : Coeficiente de amplificación de la componente impulsiva

C_c : Coeficiente de amplificación de la componente convectiva

R_{wi} : Factor de modificación de la componente impulsiva

R_{wc} : Factor de modificación de la componente convectiva

ϵ : Coeficiente de masa efectiva” (Guillén & Rojas, 2017, págs. 65-66).

“Tanque rectangular
$$\epsilon = \left[0.0151 \left(\frac{L}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \left(\frac{L}{H_L} \right) + 1.021 \right] \leq 1.0$$

Tanque circular
$$\epsilon = \left[0.0151 \left(\frac{D}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \left(\frac{D}{H_L} \right) + 1.021 \right] \leq 1.0$$

L: longitud del tanque

D: Diámetro del Tanque

H_L : Altura del líquido” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 66).

“Una vez obtenida las fuerzas horizontales, el cortante total en la base (V), de manera general, debe ser calculada con la siguiente ecuación” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 66).

$$V = \sqrt{(P_l + P_w + P_r)^2 + P_c^2}$$

“Asimismo, el momento en la base de la pared del tanque (M_b)” (Guillén & Rojas, 2017, pág.

66)

$$M_w = P_w \times h_w$$

$$M_r = P_r \times h_r$$

$$M_l = P_l \times h_l$$

$$M_c = P_c \times h_c$$

$$M_b = \sqrt{(M_l + M_w + M_r)^2 + M_c^2}$$

“De igual manera, el sobre momento en la base del tanque (M_o), es decir, incluyendo las

fuerzas en el fondo del tanque” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 67):

$$M_w = P_w \times h_w$$

$$M_r = P_r \times h_r$$

$$M_l' = P_l \times h_l'$$

$$M_c' = P_c \times h_c'$$

$$M_o = \sqrt{(M_l' + M_w + M_r)^2 + M_c'^2}$$

“Las propiedades dinámicas, tales como el periodo y frecuencia, según el código ACI-350-01, puede ser determinado especialmente para tanques de concreto de la siguiente forma”

(Guillén & Rojas, 2017, pág. 67):

“Para tanques rectangulares

Frecuencia Circular de Vibración para la Masa Impulsiva (ω_i)

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dónde:

m: $m_w + m_i$

m_w : masa del muro m_i : masa impulsiva

k: rigidez del muro del tanque

$$k = \frac{E_c}{4 \times 10^6} \times \left(\frac{t_w}{h}\right)^3$$

E_c : módulo de elasticidad del concreto

t_w : espesor del muro

$$h = \frac{(h_w m_w + h_i m_i)}{(m_w + m_i)}$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}$$

Periodo Natural de Vibración para la Masa Impulsiva (ω_i)

$$\text{Frecuencia } \omega_i = C_i \times \frac{12}{H_L} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c}} \text{ Vibración para la Masa Convectiva } (\omega_c)$$

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{L}}$$

Periodo Natural de Vibración para la Masa Convectiva (T_c)” (Guillén & Rojas, 2017, págs. 67-68).

$$\lambda = \sqrt{3.16 g \tanh[3.16(H_L/L)]}$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c}$$

“Con todos estos parámetros aclarados y desarrollados, se puede ingresar los datos a un software de análisis estructural para encontrar la respuesta sísmica siguiendo el modelo masa-resorte; sin embargo, también se ha desarrollado las posibilidades para efectuar los cálculos manualmente” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 70).

“Finalmente, el ACI-350, proporciona las siguientes expresiones para el cálculo del oleaje máximo, un tanto diferente al propuesto por Housner” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 70).

Fórmula para tanque rectangular $d_{max} = \left(\frac{L}{2}\right) (ZSI \times C_c)$

Fórmula para tanque circular $d_{max} = \left(\frac{D}{2}\right) (ZSI \times C_c)$

“Dónde:

L: Longitud de tanque rectangular,

D: Longitud de tanque circular,

Z: Factor de Zona S: Factor de Suelo,

I: Factor de Importancia,

Cc: Coeficiente de Amplificación Espectral” (Guillén & Rojas, 2017, págs. 70-71)

“Como se observa en las ecuaciones, la oscilación máxima según el ACI solo depende de la geometría del tanque y parámetros sísmicos” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 71).

3.4.2 MODELO A PARTIR DE ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS O ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

“Para considerar el movimiento de la superficie del líquido en el análisis sísmico de tanques, primero se debe de entender y comprender las ecuaciones que gobiernan dicho movimiento basado en la mecánica de fluidos. La presente tesis propone usar las ecuaciones de Navier-Stokes para resolver la respuesta sísmica de tanques con contenido líquido” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 71).

Para esto, Costarelli citado por (Guillén & Rojas, 2017), aporta las siguientes ecuaciones: “Las ecuaciones de Navier-Stokes modelan el comportamiento de cualquier fluido mediante la conservación de 3 cantidades, a saber: masa, cantidad de movimiento y energía. (...) Las ecuaciones de Navier-Stokes conforman un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, es por ello que (a excepción de casos muy simples) no se tienen soluciones analíticas conocidas” (pág. 71).

“De esta manera, se entiende que estas ecuaciones están basadas en las leyes de la conservación de la energía y que no hay precedente de su resolución total a nivel analítico. Anteriormente estos modelos no eran usados debido a su extremada complejidad y extenuante simulación; sin embargo, a medida que la tecnología avanza da pie al uso frecuente de éstas hasta simular problemas complejos eficientes en tiempo y precisión.” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 71)

“Las ecuaciones de Navier-Stokes aplican para el movimiento de cualquier fluido de cualquier densidad y viscosidad variable. Sin embargo, para un fluido ideal, es decir un fluido incompresible, fluido no viscoso y fluido homogéneo, después de aplicar la segunda ley de Newton y la conservación de masa y sin considerar fuerzas

externas, las ecuaciones de Navier-Stokes, pueden escribirse en coordenadas cartesianas la siguiente manera:” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 71)

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{1 \leq j \leq n} u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ \sum_{1 \leq i \leq n} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \quad i = 1, \dots, n\end{aligned}$$

Donde:

u_i : velocidad en i

x_j : posición en j

p : presión

“Las ecuaciones se resuelven mediante la discretización espacial y temporal denominado dominio, para poder ser tratada de manera más fácil por un ordenador” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 72).

3.4.2.1 Ecuaciones para tanque rectangular.

“Para el caso del análisis de tanques rectangulares se optó por seguir los pasos recomendamos por Ghammaghami (2010). Para analizar las ecuaciones necesarias para la simulación numérica del movimiento del líquido en un tanque rectangular, en primer lugar, se emplea un sistema cartesiano de coordenadas para describir la posición de cualquier punto de la superficie del líquido, para un tanque de agua de dimensiones $a \times b$ (largo \times ancho) y de profundidad h , el punto de origen en el centro del recipiente y $z=h/2$ que coincide con la superficie libre del agua” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 73)

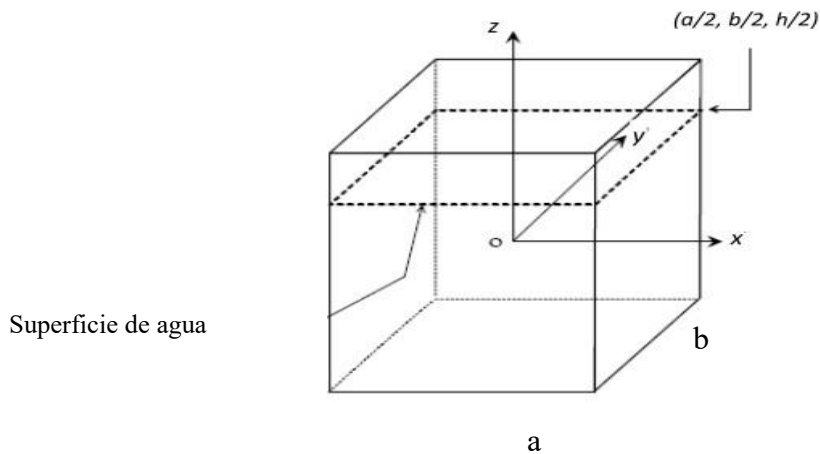


Figura 28. “Sistema de coordenadas para la obtención de las ecuaciones de oscilación de la superficie libre del agua en un tanque rectangular.”

Fuente: (Ghammaghami, 2010)

“Para el tanque de base rígida y fluido no viscoso e incompresible, la velocidad del fluido puede ser derivada como el potencial de la velocidad Φ , con sus componentes u , v , w en los ejes x , y , z , respectivamente. Asimismo, debe satisfacer la ecuación de Laplace en cualquier momento” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 73).

Es decir:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{or} \quad \nabla^2 \Phi = 0$$

“Para el fluido no viscoso, las ecuaciones de conservación del momento pueden integrarse para producir una única ecuación escalar denominado ecuación de Bernoulli”

(Guillén & Rojas, 2017, pág. 74):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + gz + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) = f(t)$$

“Donde, P es la presión, ρ_l es la densidad del fluido, y g es la aceleración de la gravedad y $f(t)$ es la constante de integración. Como, v, y w componentes de la velocidad son pequeños, los valores cuadrados de estas cantidades también son pequeños y se pueden despreciar, quedando como resultado la ecuación de Bernoulli de la siguiente forma”

(Guillén & Rojas, 2017, pág. 74):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + gz = 0$$

“Como la presión en la superficie es cero, ecuación de Bernoulli se puede reescribir así”

(Guillén & Rojas, 2017, pág. 74):

$$\frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial t} + g\delta(x, y, t) = 0$$

$$z = h/2$$

“Suponiendo que los desplazamientos $\delta(x, y, t)$ en la superficie libre en $z = h/2$ son muy pequeños y despreciables, finalmente la ecuación de Bernoulli se puede escribir” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 74):

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

$$z = h/2$$

“En la superficie húmeda del tanque, es decir la superficie del agua que está en contacto con el tanque, la velocidad del flujo perpendicular al plano de este $V_n(t)$ (dirección normal) será igual a la velocidad del tanque asumiendo que las tensiones viscosas son despreciables” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 75).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_n(t)$$

“Cabe resaltar que, para tanques de paredes rígidas, $V_n(t)$ es igual a la velocidad del terreno; sin embargo, de tanques de pared flexible, se debería considerar y agregar las velocidades relativas debido a la flexibilidad de la pared” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 75).

“Para la solución de las ecuaciones, Ghammaghami (2010) adoptó el método de la NASA-SP-106. Asimismo, por simplicidad, el movimiento del tanque se supone que es armónico y variante con el tiempo” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 75):

3.4.2.2 Ecuaciones para tanque circular.

“Para el caso del análisis de tanques cilíndricos, se procede de similar forma que los tanques rectangulares; con la excepción de que se tiene que trabajar en coordenadas polares. Para este caso, se sigue las recomendaciones Ibrahim (2005), quien se apoya en la serie de Fourier-Bessel para la solución de ecuaciones. De igual manera, se define primero el sistema de coordenadas, como lo muestra la figura 3.52, esta vez en coordenadas polares para un tanque cilíndrico de agua de radio R y h de profundidad, el punto de origen en el centro del recipiente y $z=h/2$ que coincide con la superficie libre del agua cuyo desplazamiento está definido en la Ec. (3.67), como $X_0 \sin \Omega t$ ” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 79).

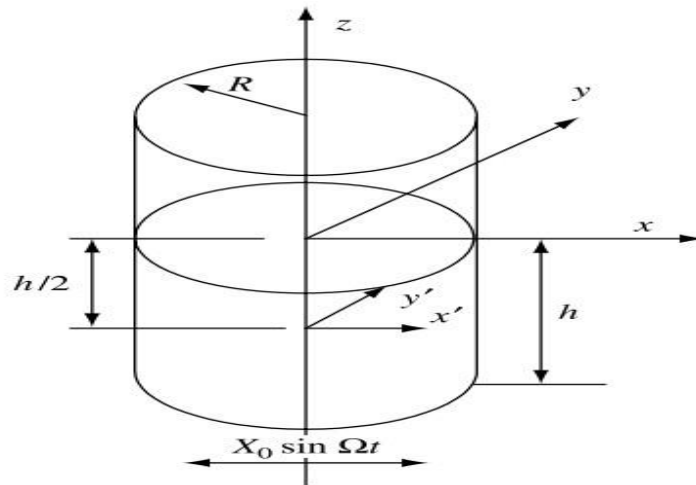


Figura 29. Sistema de coordenadas para la obtención de las ecuaciones de oscilación de la superficie libre del agua en un tanque circular

Fuente: Ibrahim 2005

Las coordenadas son: $\xi_1 = r$, $\xi_2 = \theta$, $\xi_3 = z$

En tal sentido, la velocidad potencial es:

$$-\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{at } z = \eta(r, \theta, t) \quad (\text{Ec. 3.88})$$

“Luego, de manera similar como en los tanques rectangulares, también con ayuda de las series de Fourier, Ibrahim (2005), soluciona las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido llegando a las expresiones finales que se muestran a continuación” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 80):

Frecuencia natural:

$$\omega_{1n}^2 = \frac{g\xi_{1nn}}{R} \tanh(\xi_{1nn}h/R)$$

Velocidad Potencial:

$$\Phi = -X_0\Omega \cos\theta \cos\Omega t \times \left\{ r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2R}{(\xi_{1n}^2 - 1)} \frac{\Omega^2}{(\omega_{1n}^2 - \Omega^2)} \frac{J_1(\xi_{1n}r/R) \cosh[\xi_{1n}(z+h)/R]}{J_1(\xi_{1n}) \cosh(\xi_{1n}h/R)} \right] \right\}$$

Donde J_1 es la función de Bessel de primer orden

Fuerza Horizontal Resultante:

Sabiendo que la masa del fluido: $m_f = \rho\pi R h$

$$\begin{aligned}
F_x &= \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{z=-h}^0 p \cos \theta R d\theta dz \\
&= m_f X_0 \Omega^2 \sin \Omega t \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\xi_{1n} h} \frac{2R}{(\xi_{1n}^2 - 1)} \frac{\Omega^2}{(\omega_{1n}^2 - \Omega^2)} \tanh(\xi_{1n} h / R) \right]
\end{aligned}$$

Momento Total Resultante:

$$\begin{aligned}
M_y &= m_f X_0 \Omega^2 \sin \Omega t \left[\frac{h}{2} + \frac{R^2}{4h} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{\xi_{1n}} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. \times \frac{2\Omega^2}{(\xi_{1n}^2 - 1)(\omega_{1n}^2 - \Omega^2)} \frac{[2 - \cosh(\xi_{1n} h / R)]}{h \cosh(\xi_{1n} h / R)} \right]
\end{aligned}$$

Desplazamiento vertical:

$$\eta = \frac{X_0 \Omega^2}{g} \cos \theta \cos \Omega t \left[r + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R}{(\xi_{1n}^2 - 1)} \frac{\Omega^3}{(\omega_{1n}^2 - \Omega^2)} \frac{J_1(\xi_{1n} r / R)}{J_1(\xi_{1n})} \right]$$

Máximo desplazamiento del oleaje:

$$\eta_{\max} = \frac{X_0 \Omega^2}{g} \left[R + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R}{(\xi_{1n}^2 - 1)} \frac{\Omega^3}{(\omega_{1n}^2 - \Omega^2)} \right]$$

“Así como para un tanque rectangular y circular, las ecuaciones se pueden adaptar a cualquier forma de tanque. Asimismo, se rescata un fluido real tiene viscosidad y no sigue los supuestos tratados; sin embargo, son necesarios para simplificar la resolución de dichas ecuaciones” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 81).

3.4.2.3 Modelo Mecánico Equivalente a partir de las ecuaciones de movimiento de fluidos.

“A partir de las expresiones y ecuaciones de movimiento de fluidos tratados en la sección anterior, se puede proponer modelos mecánicos equivalentes como lo son el de masas y resortes y también el de masas asociadas a péndulos. A continuación, se desarrolla el modelo mecánico equivalente. Este modelo puede ser de varias masas, pero esquemáticamente se muestra un esquema con 2 masas en la siguiente figura” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 82).

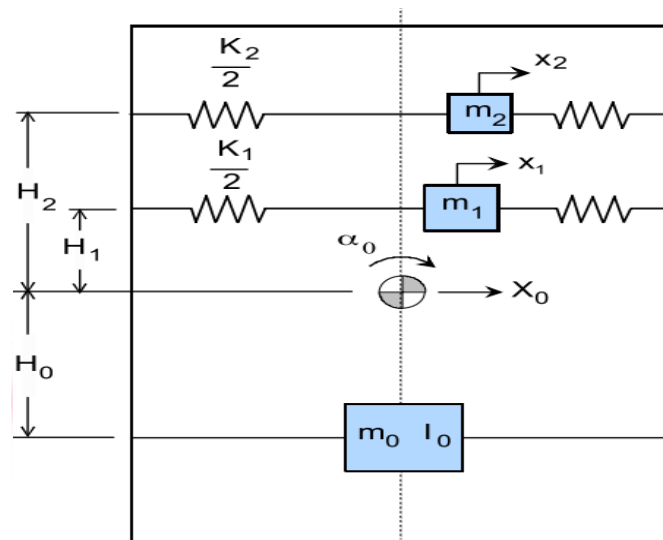


Figura 30. “Esquema del Modelo Mecánico Equivalente”

Fuente: (Dodge, 2000)

“Se resuelve la respuesta ante un movimiento horizontal oscilatorio modelo dinámico anterior (con n masas), Ghammaghami (2010) obtiene la siguiente la fuerza lateral y el momento en un tanque” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 82):

Fuerza lateral:

$$\frac{F_{amp}}{-i\Omega^2 X_0 m_{liq}} = \left[1 + \sum \frac{m_n}{m_{liq}} \left(\frac{\Omega^2}{\omega_n^2 - \Omega^2} \right) \right]$$

Momento:

$$\frac{M_{amp}}{-i\Omega^2 X_0 m_{liq} h} = \sum \frac{m_n}{m_{liq} h} \left(\frac{H_n \Omega^2 + g}{\omega_n^2 - \Omega^2} \right)$$

“Las ecuaciones se comparan con la respuesta proporcionada resolviendo las ecuaciones del movimiento de los fluidos tratados en puntos anteriores. Se notará una semejanza y repetición de términos, donde algebraicamente, se obtienen expresiones que definen las masas oscilatorias y respectivas rigideces a las que son adheridas a las paredes del tanque, la masa rígida y a las alturas correspondientes donde serán ubicadas” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 83).

De esta manera Dodge (2000) propone las siguientes ecuaciones:

“Igualando las ecuaciones anteriores se despeja la masa oscilatoria (m_n) para un $\langle n \rangle$ modo de vibración en caso de tanque rectangular” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 83):

$$\text{(Tanque Rectangular)} \quad m_n = m_{liq} \left[\frac{8a \tanh(2n-1)\pi h/a}{\pi^3 (2n-1)^3 h} \right]$$

“Similarmente, se despeja la masa oscilatoria (m_n) para un n modo de vibración en caso de tanque circular” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 83):

$$\text{(Tanque Circular)} \quad m_n = m_{liq} \left[\frac{d \tanh(2\xi_n h/d)}{\xi_n (\xi_n^2 - 1) h} \right]$$

“Asimismo, se despeja la relación de altura a la que se ubica la masa oscilatoria con respecto a la altura de agua en reposo para un tanque rectangular” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 83):

$$\text{(Tanque Rectangular)} \quad \frac{H_n}{h} = \frac{1}{2} - 2\left(\frac{a}{h}\right) \frac{\tanh(\lambda_n h/2a)}{\lambda_n}$$

4.4.2.4 Pautas a tener en cuenta para modelar con el programa SAP2000

“La masa impulsiva se puede modelar como una sola masa unida con elementos **frame** de infinita rigidez a las paredes del tanque. Mientras que la masa convectiva puede ser unida por elementos **link** de determinada rigidez con las paredes del tanque” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 85).

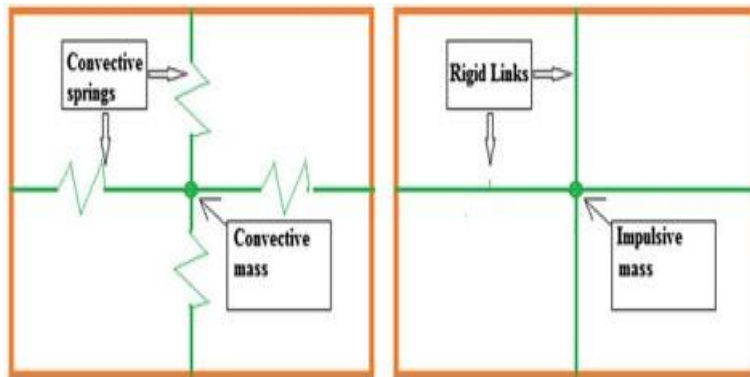


Figura 31. “Modelación de masa convectiva e impulsiva en SAP2000”

Fuente: (Matsagar, 2015)

“No obstante, la masa impulsiva también se puede modelar como masas adheridas uniformemente al muro del tanque. Siendo de muy poca influencia el número de masas a distribuir en el plano de la altura impulsiva. Sin embargo, al usar mayor número de masas produce respuestas sísmicas mayores, aunque no significativamente” (Guillén & Rojas, 2017, pág. 85).

4. LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

4.1 PROYECTO DE APLICACIÓN

4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El modelo un reservorio tipo fuste cuya capacidad de trabajo es de 250 m³ de volumen, situado en la localidad de Ventanilla-Lima, tipo de suelo intermedio, con 1.6 kg/cm² de capacidad admisible. Material del tanque: concreto armado (f'_c mínimo = 210 kg/cm²).

4.1.2. PREDIMENSIONAMIENTO

Altura del nivel de agua: 4.3 m

Se toma el modelo de tanque circular elevado tipo fuste.

Vol. = Área Base x h	
Siendo:	
h = 4.3 m,	Área Base = 58.09 m ²
R = 4.3 m	

$h/D = 4.3/8.6 = 0.5 \approx 0.40$ cumpliendo por cerca lo recomendado, Penalba (2010) geometría propuesta, Figura 34:

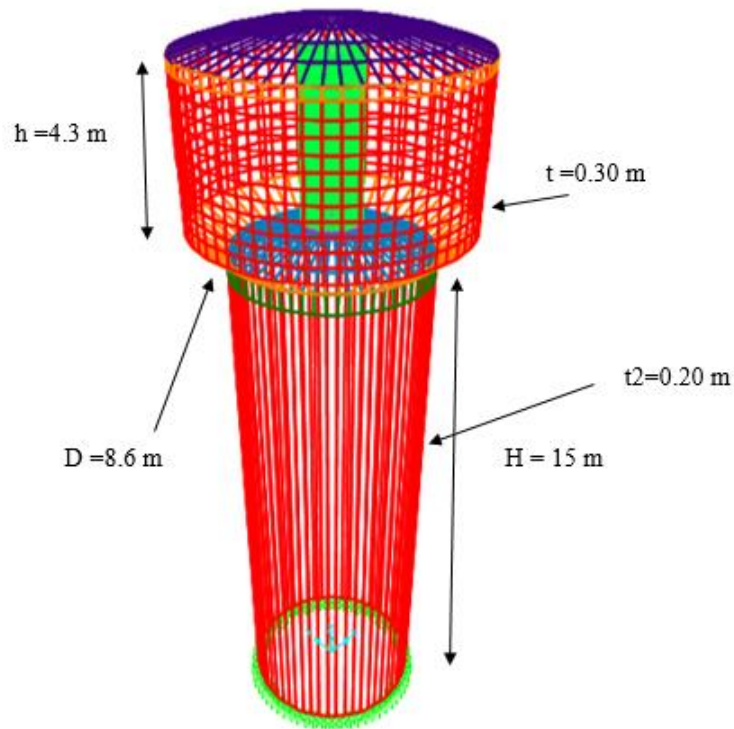


Figura 32. “Propuesta de reservorio de 250 m³”

Fuente: Elaboración Propia

tomaremos 80 cm de borde libre, no se evaluará el peso del techo(losa), solo se enfocará el análisis de fuerzas dinámicas generadas por el agua, de esta manera se reduce la fuerza de cortante generada por el peso propio del reservorio. Verificaremos oleaje máximo para corroborar si la distancia dejada es suficiente.

4.2. CÁLCULO Y ANÁLISIS DINÁMICO DE PROPUESTAS DEL PROYECTO

A continuación, se presenta el cálculo y análisis mediante el uso de la teoría de Housner y método de Navier-Stokes.

4.2.1 TANQUE ELEVADO POR EL MÉTODO DE HOUSNER

A continuación, se detallan los datos para obtener los factores sísmicos de un tanque elevado, por medio del uso de las ecuaciones de Housner, en base a la norma técnica internacional ACI y normativa peruana E.030 (reglamento nacional de edificaciones).

4.2.1.1 Datos generales para el cálculo.

1. Dimensiones del Tanque (Condición Tanque Lleno)

Altura del agua	h	=	4.3 m
Diámetro del Tanque	D	=	8.6 m
Radio del Tanque	R	=	4.3 m
Volumen efectivo de agua	V	=	250 m ³
Densidad del Agua	ρ	=	1 Tn/m ³

2. Material: Hormigón o concreto

Capacidad a compresión	f'_c	=	210 kg/cm ²
Peso específico del Concreto	γ_c	=	2.40 Tn/m ³
Módulo de Elasticidad Concreto	E_c	=	217370 kg/cm ²

3. Parámetros de Muros y Losa de Fondo

Borde Libre	B_L	=	0.80 m
Espesor de Muro	t_w	=	0.30 m
Espesor de Losa Fondo	t_f	=	0.15 m
Espesor de Losa Techo	t_r	=	0.0 m

4. Parámetros Sísmicos

Parámetro de ubicación	Z	=	0.45
Parámetro de utilidad	I	=	1.3
Parámetro de suelo	S	=	1.05
Tiempo de vibración, suelo	T_p	=	0.6 s
Factor de Respuesta Impulsivo	R_{wi}	=	2.75
Factor de Respuesta Convectivo	R_{wc}	=	1.00
Aceleración gravedad	g	=	9.81 m/s ²

4.2.1.2 Modelo masa-resorte.

Con las ecuaciones expuestas en los ítems anteriores, ecuaciones de masas, ubicación y rigidez se procede a calcular las masas tanto impulsivas como convectivas, así como su ubicación, también la rigidez del resorte de conexión con la masa convectiva. Ya obtenidos estos resultados se procede a hallar la frecuencia y el periodo. Todo esto se ilustra a continuación el modelo descrito en la figura 33.

Masa del líquido contenido	M	=	250 tn
Masa impulsiva	M_0	=	127.75 tn
Masa convectiva	M_1	=	97.25 tn
Rigidez del Resorte	K_1	=	850 tn/m
Altura de masa impulsiva	h_0	=	1.61 m
Altura de masa convectiva	h_1	=	2.55 m
Periodo de vibración	T	=	3.6 s
Frecuencia de vibración	ω	=	1.7 rad/s

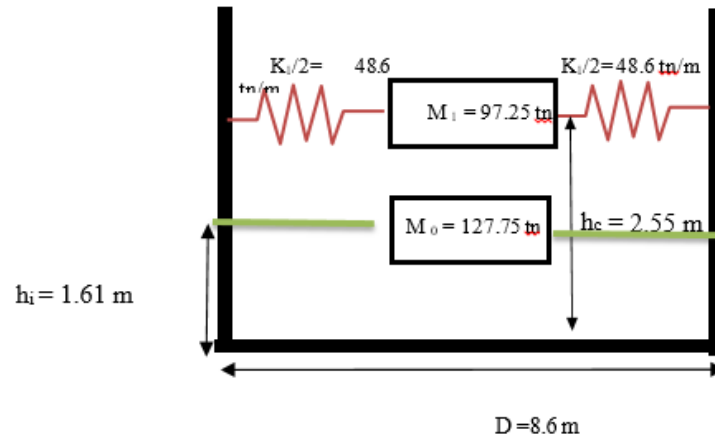


Figura 33. “Modelo Masa-Resorte para la propuesta del tanque elevado”

Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.3 Espectro de Pseudo-aceleraciones

El espectro es calculado con la norma técnica peruana E.30 del reglamento nacional de edificaciones, es el espectro que más se adapta a nuestro modelo, para calcularlo se utilizan una serie de ecuaciones expuestas en los capítulos anteriores, donde destacan los factores de la zona de influencia o ubicación, utilidad de la construcción, tipo de suelo, etc. A continuación, su gráfica.

T	C	Sa (Rwi)	Sa (Rwc)
0	2.5	5.35	14.72
0.4	2.5	5.35	14.72
0.5	2.5	5.35	14.72
0.6	2.5	5.35	14.72
0.7	2.1	4.59	12.61
0.8	1.9	4.01	11.04
0.9	1.7	3.57	9.81
1	1.5	3.21	8.83
1.2	1.3	2.68	7.36
1.4	1.1	2.29	6.31
1.6	0.9	2.01	5.52
1.8	0.8	1.78	4.91
2	0.8	1.61	4.41
2.2	0.7	1.46	4.01
2.4	0.6	1.34	3.68
2.6	0.6	1.23	3.40
2.8	0.5	1.15	3.15
3	0.5	1.07	2.94
4	0.4	0.80	2.21
5	0.3	0.64	1.77
6	0.3	0.54	1.47
7	0.2	0.46	1.26
8	0.2	0.40	1.10
9	0.2	0.36	0.98
10	0.2	0.32	0.88

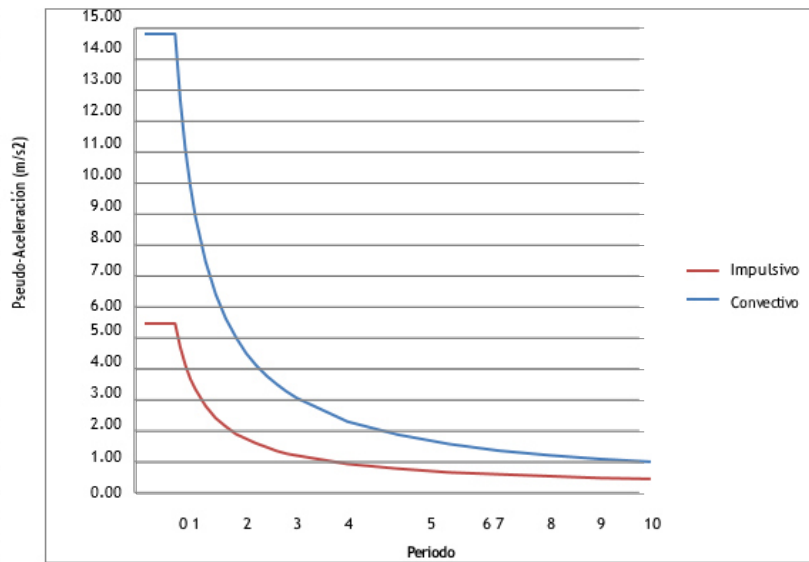


Figura 34. “Espectro de Pseudo-aceleraciones”

Fuente: Elaboración Propia

4.2.1.4 Cálculo de pesos actuantes

Entre los pesos actuantes encontramos el del fuste, muro, base del reservorio así como los pesos impulsivos y convectivos, resaltamos que el peso del techo no es considerado para dicha esta tesis ya que es prioridad la fuerza ejercida por el fluido. Los pesos de los componentes estructurales son hallados usando el peso específico del concreto y el volumen de los sistemas estructurales.

Peso del muro	W_w	=	83.6 tn
Peso del techo	W_r	=	0 tn
Peso de la base	W_b	=	4 tn
Peso del Fuste	W_f	=	168.6 tn
Factor corrección	ε	=	0.68

Peso impulsivo	w_i	=	127.75 tn
Peso convectivo	w_c	=	97.25 tn

4.2.1.5 Cálculo de periodos y frecuencias

Coeficientes Frecuencia Impulsiva	C_w	=	0.158
	C_l	=	0.327
Frecuencia Impulsiva	ω_i	=	180.4 rad/s
Periodo Impulsivo	T_i	=	0.02 s
Coeficiente Frecuencia Convectiva	λ	=	5.81 s
Frecuencia Convectiva	ω_c	=	1.5 rad/s
Periodo Convectiva	T_c	=	3.02 s
Factor Amplificación Impulsivo	C_i	=	2.29
Factor Amplificación Convectivo	C_c	=	0.37

4.2.1.6 Cálculo de fuerzas laterales

La acción lateral debido a la inercia y aceleración de la estructura es calculada por las ecuaciones ya antes expuestas, mostramos a continuación los resultados obtenidos en forma ordenada para cada componente estructural y fluido.

Fuerza lateral de pared	P_w	=	41 tn
Fuerza lateral del techo	P_r	=	0 tn
Fuerza lateral del Fuste	P_r	=	30 tn
Fuerza lateral de masa impulsiva	P_i	=	64 tn
Fuerza lateral de masa convectiva	P_c	=	21 tn

Ilustración de los resultados obtenidos para fuerzas convectivas e impulsivas, se

muestran en las figuras 35 y 36 respectivamente, se muestra sus gráficas.

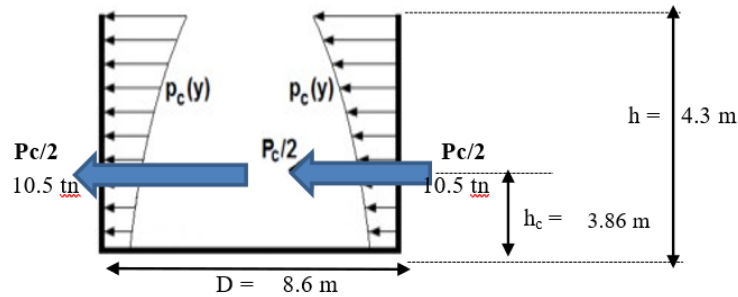


Figura 35. “Fuerza lateral de la presión convectiva para el tanque elevado”

Fuente: Elaboración propia

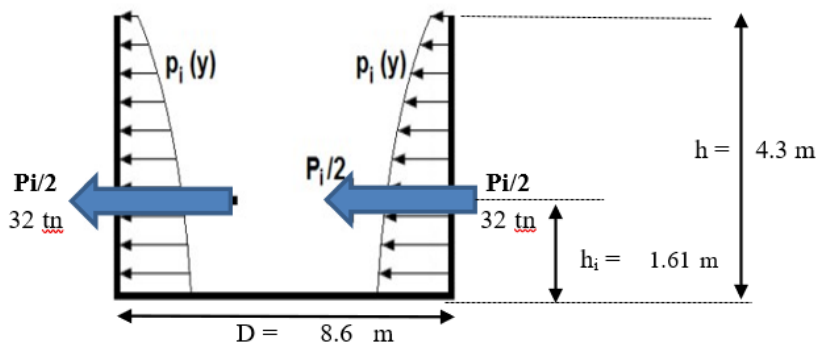


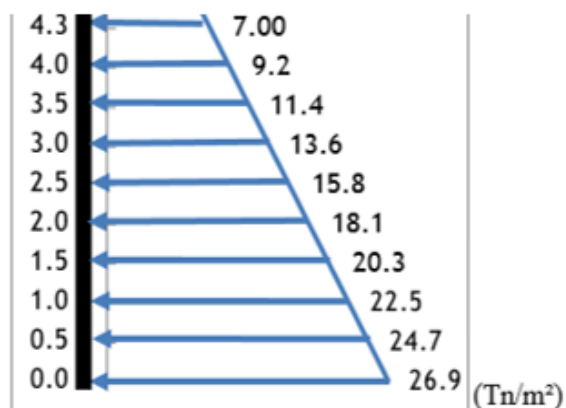
Figura 36. ” Fuerza lateral de la presión impulsiva para el tanque elevado”

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.7 Cálculo de la distribución de presiones.

Se muestra en la figura 37, la forma de distribución lineal de la presión impulsiva y convectiva, se hizo uso de las ecuaciones antes expuestas para su cálculo. Podemos notar que para la presión impulsiva es una distribución de forma creciente verticalmente hacia abajo, en cambio para la convectiva es al revés.

Distribución de Presión Impulsiva
Altura Muro



Distribución de Presión Convectiva
Altura Muro

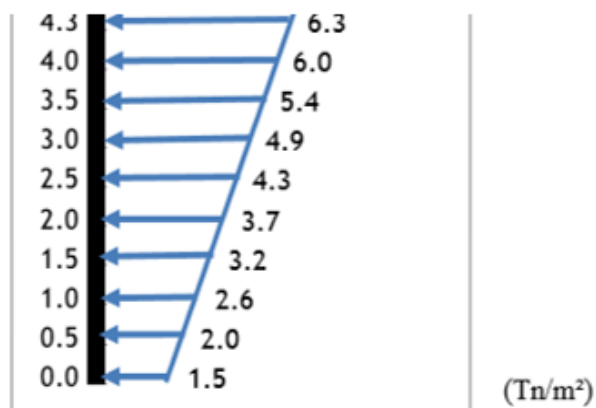


Figura 37. Gráfica de distribuciones de presión impulsiva y convectiva.

Fuente: elaboración propia

4.2.1.8 Cálculo de la cortante basal y momento en la base

Se hallan el corte basal generado por el reservorio, así como los momentos generados por las componentes estructurales y fluido, tales como pared, masa impulsiva y convectiva, usando las ecuaciones expuestas en esta tesis. Todos estos resultados nos servirán para evaluar el comportamiento del reservorio y la comparación entre uno y otro método.

Cortante Basal	V =	84.43 tn
Momento Pared	M _w =	120 tn-m
Momento de techo	M _r =	0 tn-m
Momento de Masa impulsiva	M _i =	150 tn-m
Momento de Masa convectiva	M _c =	170 tn-m

Momento en la base	$M_b = 350 \text{ tn-m}$
--------------------	--------------------------

4.2.1.9 Cálculo del oleaje máximo

Cálculo de amplitud y oscilación máxima por el método de Housner, se calcula en base a las ecuaciones de Housner y ACI expuestas anteriormente. A continuación, el resultado en el siguiente recuadro.

Máxima amplitud	$A1 = 0.24 \text{ m}$
Máxima aceleración	$a = 4.25 \text{ m/s}^2$
Máxima aceleración según Housner	$dmáx = 0.45 \text{ m}$
Máxima Oscilación según ACI	$dmáx = 1.13 \text{ m}$

4.2.2 Cálculo con SAP2000

Par el modelamiento en SAP se necesitó de tener el espectro de pseudo aceleraciones antes indicado, se procede a colocar resortes a la masa convectiva, para de esta manera simular el movimiento del fluido, mientras tanto la masa impulsiva es colocada sobre el muro para que replique el movimiento del mismo, el programa calcula el periodo fundamental de vibración que viene a ser el tiempo que se toma en una oscilación, dicho reservorio, también nos da la cortante basal aproximada y el momento respectivo, a continuación los resultados.

Periodo Fundamental:	$T = 3.62 \text{ s}$
Cortante Basal:	$V = 80.20 \text{ Tn}$
Momento en la Base:	$M=373\text{Tn.m}$

4.2.3 TANQUE ELEVADO POR EL MÉTODO DE ECUACIONES DE NAVIER-STOKES.

4.2.3.1 Cálculo del Modelo Mecánico Equivalente.

El modelo mecánico por las ecuaciones de Navier Stokes y las ecuaciones que este modelo implica y expuestas en la presente tesis, nos sirven para poder hallar el número de modos de vibración, estos modos de vibración son inherentes a cada sistema estructural una vez hallados estos modos, se procede a calcular la masa de oscilación o masa oscilatoria para este caso masa oscilatoria convectiva. Se hace una simulación de masa y resortes, se halla por las ecuaciones de Navier Stokes la rigidez de dichos resortes, también las alturas convectivas dinámicas en torno a los modos de vibración, finalmente se halla la masa estática o rígida. Se muestra en unas tablas el resultado de todas las variables presentes.

Parámetro		Modelo 1 Masa	Modelo 2 Masas		Modelo 3 Masas		
Modos Vibración	n	n=1	n=1	n=2	n=1	n=2	n=3
Frecuencia Natural	ω_n	1.42 rad/s	1.42 rad/s	2.52 rad/s	1.42 rad/s	2.52 rad/s	3.2 rad/s
Masa Oscilatoria	m_n	115 tn	115 tn	4 tn	115 tn	4 tn	1 tn
Localización Masa Oscilatoria	H_n	2.02 m	2.02 m	0.66 m	2.02 m	0.66 m	1.61 m
Rigidez de Resortes	K_n	750 tn/m	750 tn/m	72 tn/m	750 tn/m	72 tn/m	30 tn/m
Masa Rígida	m_o	135 tn	131 tn		130 tn		
Localización Masa Rígida	H_o	1.71 m	1.74 m		1.75 m		

Figura 38. “Parámetros del modelo mecánico equivalente para el tanque elevado.”

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2 Cálculo de Cortante y Momento en Base

Con el uso del programa SAP 2000, se genera la siguiente tabla.

Tabla5.

masas, así como resultados de momento y cortante actuando sobre el reservorio elevado.

Suposiciones hechas en base a la teoría de Navier Stokes	Periodo [s]	Cortante [Tn]	Momento [Tn-m]
Tanque con 1 masa (SAP 2000)	3.80	75	317
Tanque con 2 masas (SAP 2000)	3.80	69	309
Tanque con 3 masas (SAP 2000)	3.80	64	300

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3.3 Cálculo de Variación del Oleaje

En primer lugar, se halla la frecuencia así como el periodo de vibración natural para cada modo, en conjunto con el espectro de pseudoaceleraciones

Tabla6.

modos de vibrar, como frecuencia natural y periodo, cada resultado está asociado a cada modo de vibración del tanque elevado.

n	ξ_n	ω_n	T	Sa
[-]	[-]	[rad/s]	[s]	[m/s ²]
1	1.841	1.42	4.042	3.856
2	4.983	2.52	2.378	3.713
3	8.124	3.2	1.8621	4.741
4	11.266	3.97	1.5813	5.583
5	14.407	4.49	1.3983	6.314
6	17.549	4.96	1.267	6.969
7	20.691	5.38	1.1668	7.567
8	23.832	5.78	1.0872	8.121
9	26.974	6.15	1.0219	8.639
10	30.115	6.50	0.9672	9.129
11	33.257	6.83	0.9204	9.593
12	36.399	7.14	0.8797	10.036
13	39.540	7.44	0.8441	10.460
14	42.682	7.73	0.8124	10.868
15	45.823	8.01	0.7841	11.261

Fuente: Elaboración propia

Después usando las ecuaciones del movimiento se calcula el desplazamiento del fluido, en este caso se han considerado los 10 primeros modos de vibración. La figura línea abajo muestra gráficamente este movimiento del fluido considerando 5 modos de vibrar (modo 1, modo 2, modo 3, modo 4, y modo 5) en orden ascendente, para ello se usó la opción de grafica en la hoja de cálculo Excel, mediante una correspondencia simple de la posición en X en torno al diámetro y la posición en Y en torno a los modos de vibrar.

Tabla7.

15 modos de vibrar considerados para el análisis en el tanque elevado circular, uso de ecuaciones de Navier Stokes.

Modo	Coordenada a lo largo del diámetro del tanque (m)											
n	X(m)	-4.30	-3.50	-2.63	-1.75	-0.88	0.00	0.88	1.75	2.63	3.50	4.30
1	δ	-1.30	-0.93	-0.73	-0.50	-0.26	0.00	0.26	0.50	0.73	0.93	1.30
2	δ	-0.22	0.34	0.40	0.35	0.20	0.00	-0.20	-0.35	-0.40	-0.34	0.22
3	δ	-0.10	0.04	-0.13	-0.24	-0.19	0.00	0.19	0.24	0.13	-0.04	0.10
4	δ	-0.06	-0.10	-0.04	0.12	0.16	0.00	-0.16	-0.12	0.04	0.10	0.06
5	δ	-0.04	-0.01	0.08	-0.02	-0.14	0.00	0.14	0.02	-0.08	0.01	0.04
6	δ	-0.03	0.05	-0.03	-0.04	0.11	0.00	-0.11	0.04	0.03	-0.05	0.03
7	δ	-0.03	0.01	-0.03	0.06	-0.08	0.00	0.08	-0.06	0.03	-0.01	0.03
8	δ	-0.02	-0.03	0.04	-0.04	0.05	0.00	-0.05	0.04	-0.04	0.03	0.02
9	δ	-0.02	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.00	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.02
10	δ	-0.01	0.02	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.02	-0.02	0.01
11	δ	-0.01	0.00	0.02	-0.03	0.01	0.00	-0.01	0.03	-0.02	0.00	0.01
12	δ	-0.01	-0.02	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.02	-0.02	-0.01	0.02	0.01
13	δ	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	0.03	0.00	-0.03	0.01	0.02	0.00	0.01
14	δ	-0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.03	0.00	0.03	0.01	-0.01	-0.01	0.01
15	δ	-0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.01
Máximo	Σ	-1.90	-0.62	-0.45	-0.29	-0.14	0.00	0.14	0.29	0.45	0.62	1.90

Fuente: Elaboración propia

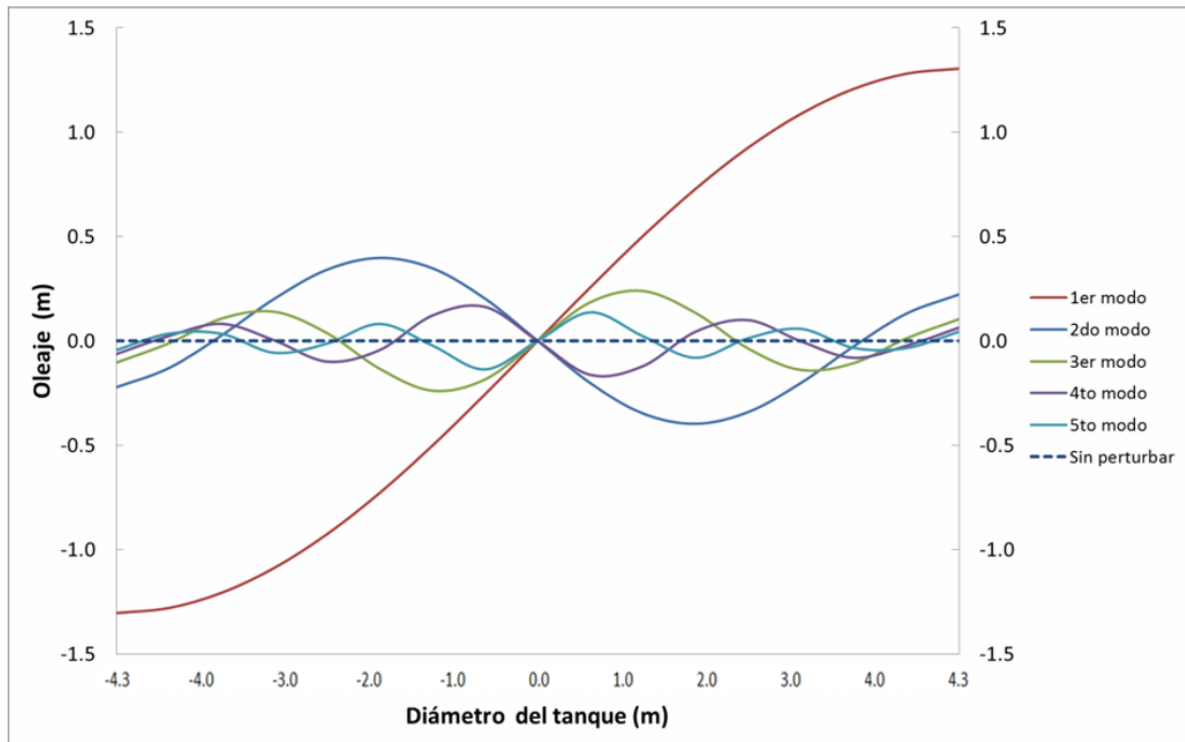


Figura 39. “Oleaje en los primeros 5 modos de vibrar para un tanque elevado circular”

Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se muestra la gráfica de presión convectiva e impulsiva respectivamente, usando para tal gráfica la normativa ACI y Housner, en ella podemos observar la altura del muro y la variación lineal de la presión del fluido, como se ve hay una gran diferencia de presiones para de las fuerzas convectivas e impulsivas.

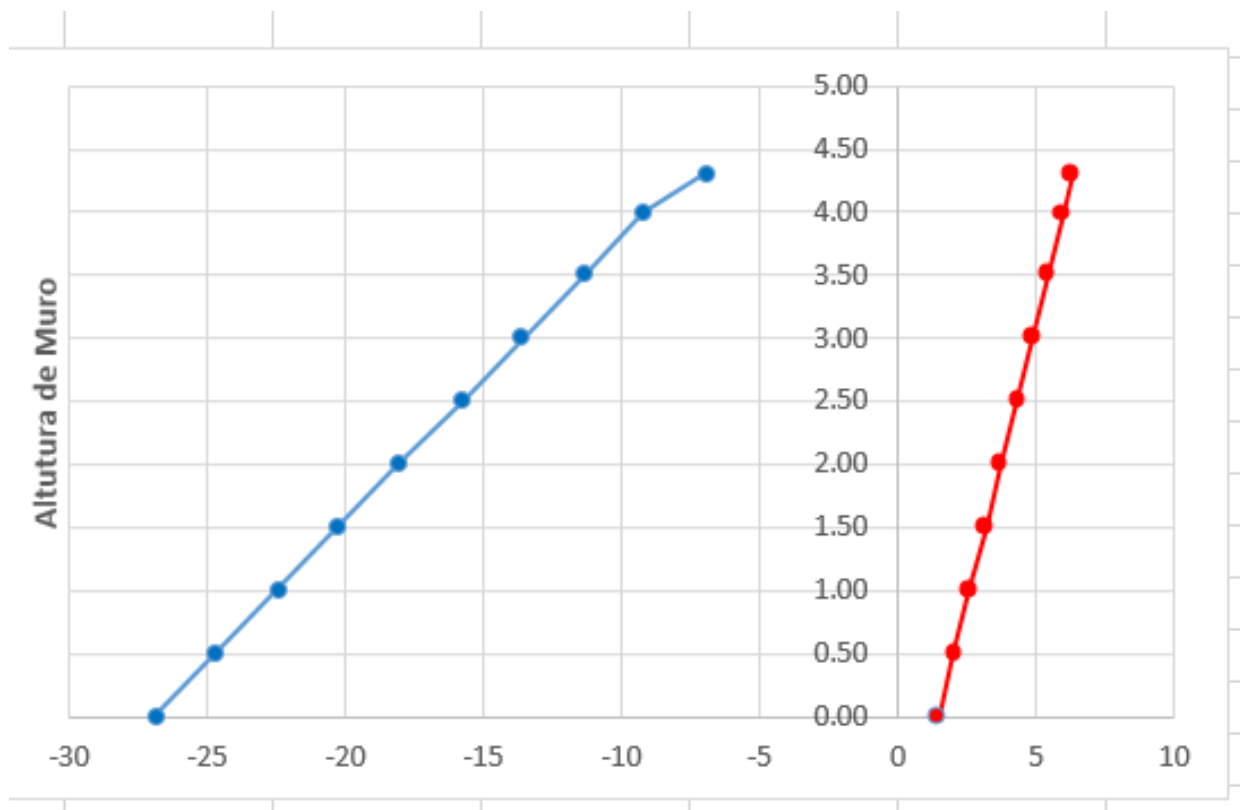


Figura 40. “Gráfica de presiones y su variabilidad con respecto a la altura, para un tanque elevado circular tipo fuste”

Fuente: Elaboración propia

Presiones Impulsivas

Presiones Convectivas

Como observamos, la presión impulsiva sigue una línea inversa y mayor a la presión convectiva.

Tabla8.
tabla de resultados, masa – resorte, método de Housner.

Modelo Masa-Resorte (Housner)	Periodo [s]	Cortante [Tn]	Momento [Tn-m]
Tanque Elevado (Manual)	3.6	84.43	350
Tanque Elevado (SAP 2000)	3.62	80.20	373
Variación	0%	-5%	6.16%

Fuente: Elaboración propia

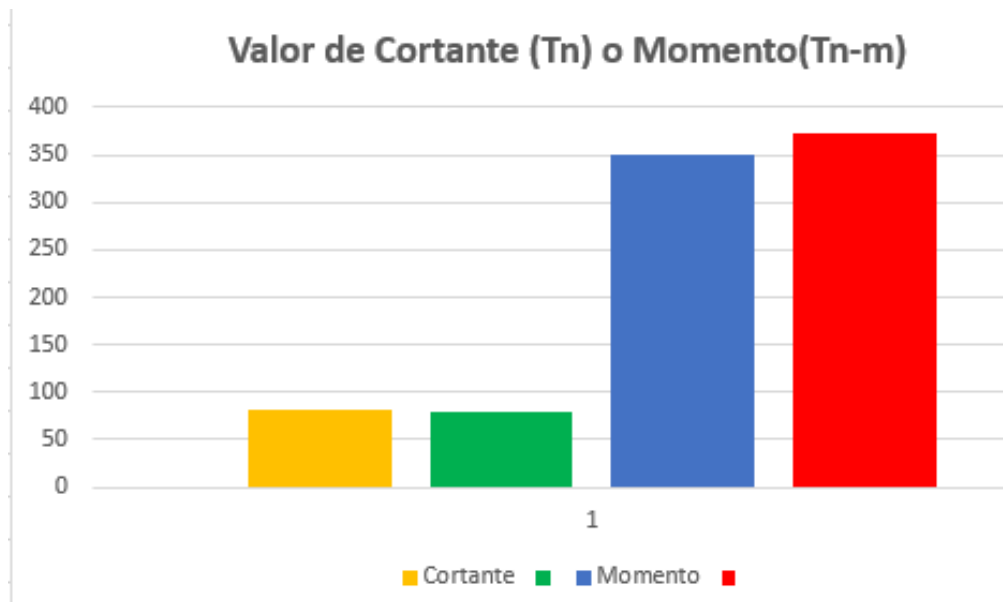


Figura 41. Gráfica de comparación entre resultados de fuerza de corte y momento, para un tanque elevado circular tipo fuste.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos nos muestran claramente la semejanza entre el cálculo manual y el computacional en este caso hecho por el SAP 2000, con variaciones de -5% y 6.16% tanto en cortante y momento respectivamente. Se hizo uso del código de diseño ACI 350 para el cálculo manual, este considera una forma de calcular diferente a una simple suma aritmética de cada respuesta sino usa otro método que promedia los resultados, llamado la suma de los mínimos cuadrados. Esta diferencia en cuanto a porcentajes se debe a que el método ACI reduce la participación de masa de la pared del tanque, en comparación con el SAP 2000 que trabaja con la masa total. Si bien es cierto estos dos métodos de cálculo generan ciertas diferencias podemos concluir que no son diferencias tan grandes como para tomarlas en cuenta y descartar uno u otro método, pero si se recalca que estos resultados son obtenidos para este modelo en particular sin afirmar que nos de diferencias parecidas para un modelo diferente.

Usando las ecuaciones de Navier Stokes (modelo mecánico equivalente), se muestra a continuación los resultados de periodo de vibración, fuerza de corte y momento. Para hacerlo posible se hace uso del SAP 2000 usando de 1 a 3 masas de oscilación. A continuación, se muestra la tabla y los resultados obtenidos.

Tabla9.

“tabla que compara los resultados del modelo mecánico equivalente para 1, 2 y 3 masas del tanque elevado”

Modelo Mecánicos Equivalentes a partir de ecuaciones Navier Stokes	Periodo [s]	Cortante [Tn]	Momento [Tn-m]
TANQUE ELEVADO			
Tanque con 1 masa (SAP 2000)	3.80	75	317
Tanque con 2 masas (SAP 2000)	3.80	69	309
Variación	0%	-8%	-2.5%
Tanque con 1 masa (SAP 2000)	3.80	75	317
Tanque con 3 masas (SAP 2000)	3.80	64	300
Variación	0%	-14.6%	-5.36%
Tanque con 2 masa (SAP 2000)	3.80	69	309
Tanque con 3 masas (SAP 2000)	3.80	64	300
Variación	0%	-7.2%	-2.9%

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los resultados, pasamos a analizarlo y podemos concluir que usando 1, 2 o 3 masas la variación de resultados no es tan distinta en cuanto al periodo y esfuerzos. Todos estos resultados en tabla se pueden colocar en una gráfica como la mostrada a continuación.

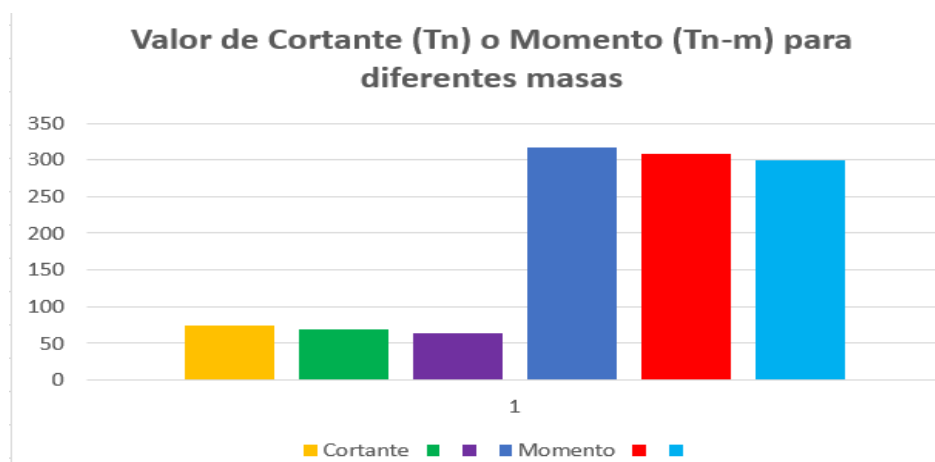


Figura 42. “Valores de Cortante y Momento, modelo mecánico equivalente 1, 2 y 3 masas por

las ecuaciones de Navier Stokes”

Fuente: Elaboración propia

5.2. APORTE DE LA INVESTIGACIÓN

Se genera la tabla en donde compararemos el resultado arrojado por el SAP 2000, método de Housner y también el modelo mecánico equivalente (ecuaciones de Navier Stokes), todo esto para un tanque elevado circular, se muestra el periodo, la fuerza cortante y el momento. A continuación, la tabla.

Tabla10.

“Comparación de respuesta sísmica de Modelos Mecánicos de Housner y a partir de Ecuaciones Navier-Stokes”

Modelo Mecánicos	Periodo [s]	Cortante [Tn]	Momento [Tn-m]
Tanque Elevado por Housner (SAP 2000)	3.62	80.20	373
Tanque Elevado Modelo Equivalente 1 masa (SAP 2000)	4.80	75	317
Variación	8%	-6.5%	-15%

Fuente: Elaboración propia

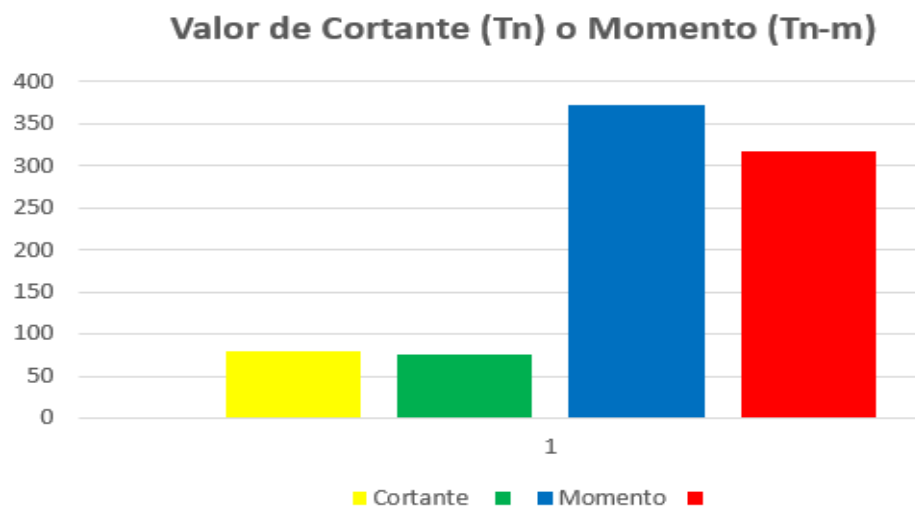


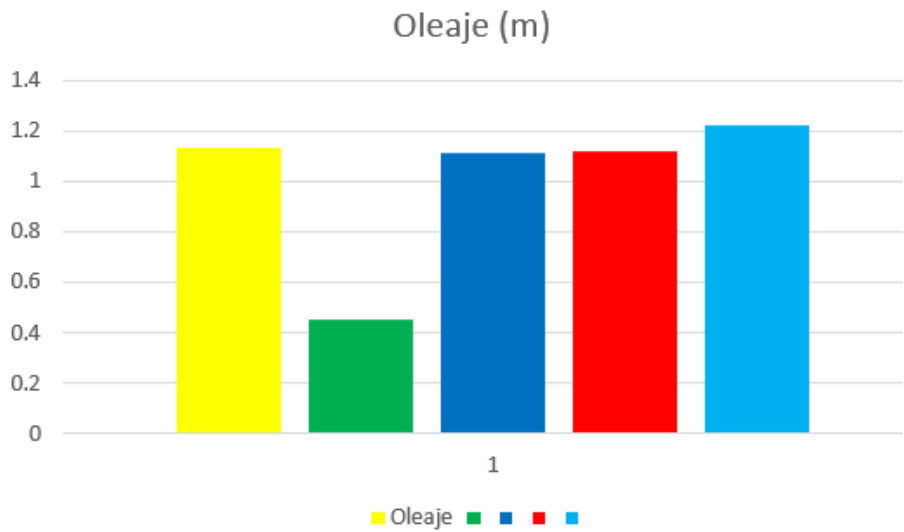
Figura 43. “Valores de Cortante y Momento para los Modelos Mecánicos de Housner y a partir

de Ecuaciones Navier-Stokes”

Fuente: Elaboración propia

Apreciamos anteriormente que el método por las ecuaciones de Navier Stokes nos da una respuesta menor en cuanto a fuerza contante con una variación de 6.5%, el momento también se ve reducido en un 12 % todo esto comparado con el método de Housner. En conclusión, entre uno y otro método se tendría una variación promedio que oscila el 12%.

A continuación, mostramos en tabla el resultado del oleaje calculado por los métodos ante ya mencionados.



Por Aci	-----
Por Houssner	-----
Por Navier stockes 1 masa	-----
Por Navier stockes 2 masas	-----
Por Navier stockes 3 masas	-----

Figura 44. Oleaje Máximo evaluado por los métodos ya antes espuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Vemos en la gráfica anterior que el método de Housner produce un oleaje menor que por las ecuaciones planteadas por ACI. Es consecuencia de que por el método de Housner nos da un menor periodo por el sistema planteado masa – resorte, por el contrario, el ACI amplifica mediante un coeficiente el accionar convectivo del fluido.

El oleaje producido por las ecuaciones de Navier Stokes van en aumento según se aumenta la masa al modelo matemático, en la siguiente tabla se hace la comparación del oleaje producido entre los diferentes métodos, Housner, ACI y Navier Stokes.

Tabla 11.
Comparación del Oleaje Máximo determinados por varios métodos

Método	Tanque Elevado Oleaje Máximo (m)
ACI 350.3-01	1.13
Housner	0.45
Variación	-60.17%
ACI 350.3-01	1.13
Navier Stokes 1 masa	1.11
Variación	-16%
ACI 350.3-01	1.13
Navier Stokes 2 masas	1.12
Variación	-1%
ACI 350.3-01	1.13
Navier Stokes 3 masas	1.22
Variación	7%

Fuente: Elaboración propia

Podemos visualizar en la tabla y gráfica anterior que el oleaje producido en el reservorio es más del doble por el método ACI que por el de Housner.

También comparamos el oleaje con 1 masa por el método mecánico equivalente y el ACI y vemos una diferencia de 16% en favor del ACI, con dos masas los oleajes se equiparan y con 3 masas, el oleaje por el método mecánico equivalente es mayor que el método del ACI.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Se aceptan los resultados que arroja el programa SAP 2000, usando el modelo de Housner, inclusive estos resultados del programa son más conservadores ya que son mayores a los calculados manualmente.
2. Por medio del modelo mecánico equivalente, se determina que, a mayor cantidad de masas usadas, se obtiene menores esfuerzos tanto de corte como de momento, pero esto no repercute en gran medida en el resultado del análisis sísmico del reservorio.
3. El método de Housner es más conservador que el método de Navier-Stokes, obteniendo resultados mayores tanto de cortante como de momento.
4. El periodo fundamental del reservorio produce el mayor oleaje, dejando sin importancia los demás modos o periodos de vibración.
5. Con Navier-Stokes obtenemos un oleaje mayor que con el método propuesto por ACI y Housner. El valor de oleaje no sobrepasa el 20% propuesto por el ACI.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Se tiene que hacer uso de cierto artificio para asemejar el modelo del SAP 2000 con el del Housner, para esto se maneja el coeficiente de masa efectiva variando el peso del reservorio en el programa SAP, también por el método de promedio llamado “suma mínima de cuadrados” se pueden hallar las fuerzas laterales convectiva, impulsiva, etc. Para esto se crea una combinación de carga.
2. Según los resultados obtenidos, se recomienda el método que tiene el ACI para el cálculo del Oleaje, ya que se obtiene un valor mayor que Housner y Navier-Stokes. En caso se decida usar el método de Navier-Stokes es necesario considerar 2 masas para su análisis y obtener resultados casi parecidos al ACI.
3. Trabajar con 1, 2 o 3 masas en el modelo equivalente no va a generar cambios sustanciales en cuanto a la respuesta de esfuerzos y oleaje, así que se recomienda usar sólo 1 masa.

6.3 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Análisis económico para reservorios de gran envergadura, usando el método de Navier-Stokes, ya que se obtienen menores resultados de esfuerzos que el método de Housner, por consecuencia menor cuantía de acero para su construcción.
- Creación de un catálogo de posibles modelos de tanque para tal capacidad, tal estructura, esto en base a la solución parametrizada de las ecuaciones de Navier-Stokes.
- Estudio en 3 dimensiones de las ecuaciones de Navier-Stokes para reservorios elevados.
- Análisis de tanques o reservorios elevados, contruidos de un material orto trópico, con contenido liquido diferente al agua, por ejemplo, aceites, con viscosidad variable.

7. BIBLIOGRAFÍA

Anconeira E. (2017). *“IMPORTANCIA DE CONSIDERAR MODELOS DINÁMICOS DE LOS TANQUES ELEVADOS EN EL ANÁLISIS SÍSMICO EN EDIFICACIONES”*. Obtenido de file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/Icanroe.pdf

Compagnoni, M., Curadelli, R., & Martinez, C. (2012). *Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitación sísmica*,. Obtenido de <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4187/4113>

Compagnoni, M., Curadelli, R., & Martinez, C. (2013). *Evaluación de modelos de tanques rectangulares contenedores de líquido bajo excitación sísmica*. Obtenido de <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4467/4397>

Coral, K., Fernández, & Shelly. (Agosto de 2018). *Análisis y diseño estructural de un tanque elevado de concreto armado con capacidad de 2000 m3*. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/624599/Coral_CK.pdf?sequence=1

Díaz del Valle, J. (2013). *Depositos circulares, rectangulares y de cualquier forma. elevados y apoyados en el suelo. normas simorresistentes ncse-02, ncsp-07, eurocode-8, aci-350 y libre*. Obtenido de https://www.thecommerce.es/WebRoot/StoreES2/Shops/eb0458/MediaGallery/Nueva_carpet4/MANUALDEMO.pdf

Fernández et al. (2006). *Estudio parametrico de la respuesta sísmica de estanques elevados de hormigón armado con aislación sísmica en la base*. Obtenido de

file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/322-Texto%20do%20artigo-1270-1-10-20081106.pdf

Gareane, A., Algreane, I., Osman, A., Othman, A., & Kasa, A. (2011). *Study The Fluid Structure Interaction Due to Dynamic Response of Elevated Concrete Water Tank* . Obtenido de <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2011/September-2011/1084-1087.pdf>

Guillén, M., & Rojas, A. (2017). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AGUA EN TANQUES APOYADOS RECTANGULARES Y CILÍNDRICOS BAJO ACCIÓN SÍSMICA*. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/622103/Guill%C3%A9n_AM.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Hernández H. (2006). *ANALISIS SÍSMICO DE TANQUES RECTANGULARES ELEVADOS*. Obtenido de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_14/te_07/ar_19.pdf

Hernández, S. (Octubre de 2007). *Comparación del diseño sísmico de estanques de acero según normas norteamericana, neozelandesa y las recomendaciones Chilenas*. Obtenido de <http://www.civil.ucsc.cl/investigacion/memorias/shernandez.pdf>

Huaringa P. (octubre de 2015). *EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA NO LINEAL DE RESERVORIOS ELEVADOS TIPO INTZE* . Obtenido de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6821/HUARINGA_PAMELA_EVALUACION_RESPUESTA_SISMICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huisa J. (2017). *“Formulacion De Una Guía De Diseño Para Mejorar La Respuesta Sismica En Reservorios De Concreto Armado Para Almacenamiento De Agua”*. Obtenido de <file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/Huisa-Chura-Carlos.pdf>

- Martínez, E., & Sánchez, L. (2004). *Análisis sísmico de tanques elevados de agua sobre diferentes sistemas estructurales de hormigón reforzado en la ciudad de Bucaramanga* . Obtenido de <https://docplayer.es/17872199-Analisis-sismico-de-tanques-elevados-de-agua-sobre-diferentes-sistemas-estructurales-de-hormigon-reforzado-en-la-ciudad-de-bucaramanga.html>
- Molina J. (2013). *Desarrollo de los procedimientos de Calculo de Tanques API 650 INCLUYENDO CALCULOS SISMICO DE NORMAS PDVSA*. Obtenido de <http://159.90.80.55/tesis/000159150.pdf>
- Penalba D. (s.f). *Análisis sismorresistente de depósitos metálicos* . Obtenido de https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10234/PFC_Daniel_Penalba_Sanchez_Presentacion.pdf
- Portillo, E. (Agosto de 2009). *Análisis y diseño para estructuras de hormigón armado en tanques elevados*. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3021_C.pdf
- Pupiales, M., & Yépez, F. (2013). *Análisis de la interacción fluido – estructura en el diseño sísmico de tanques cilíndricos de acero según las normas: americana, neozelandesa, ecuatoriana y métodos simplificados*. Obtenido de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2405/1/107099.pdf>
- Quezada W & Salinas A. (2014). *“DISEÑO Y ANALISIS DE UN RESERVORIO TIPO FUSTE DE 300 M3 EN LA CIUDAD DE TRUJILLO”*. TRUJILLO, Peru. Obtenido de http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/687/1/QUEZADA_WILDER_DISEÑO_RESERVORIO_300M3.pdf

Rivera C. (2018). *Influencia del tanque elevado en la respuesta sísmica de edificaciones aporticadas de concreto armado, Pueblo libre, Lima - 2018*". Obtenido de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/34898/rengifo_ff.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sánchez, S., & Vargas, O. (s.f.). *ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUES CILÍNDRICOS DE ALMACENAMIENTO*. Obtenido de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_11/103.PDF